

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра технічної кібернетики

«На правах рукопису»
УДК 621.865.8

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ І.Р. Пархомей
(підпис)

“ ____ ” _____ 2019 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології»

на тему: Апаратно-програмний комплекс технічних засобів управління рухом двоногого робота

Виконав: студент другого курсу, групи ІК-71мн
(шифр групи)

_____ Ренський Олексій Леонідович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник ст.викл, к.т.н., Гуменний Д.О. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент к.т.н., доц., доцент каф. ЕЗУ, Пірумов А. Є. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра технічної кібернетики

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 126 «Інформаційні системи та технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ І.Р. Пархомей
(підпис)

«___» _____ 2019 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Ренському Олексію Леонідовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Апаратно-програмний комплекс технічних засобів управління рухом двоногого робота»

наук. керівник дисертації ст. викл., к.т.н., Гуменний Д.О.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження – апаратно-програмний комплекс технічних засобів управління рухом двоногого робота.

4. Предмет дослідження – процес управління рухом двоногого робота.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити – аналіз існуючих методів і підходів до вирішення проблеми управління рухом двоногого робота; задача прямої і зворотної кінематики апарата; визначення критеріїв дотримання збереження рівноваги при двоногій ходьбі; формалізація системи управління стійкістю апарата на довільній поверхні.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу – шість плакатів.

7. Орієнтовний перелік публікацій – дві публікації.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз предметної області	01.12.2018 р.	
2	Постановка задачі	14.12.2018 р.	
3	Створення математичної моделі	14.01.2019 р.	
4	Розробка апаратної частини	20.02.2019 р.	
5	Маркетинговий аналіз стартап-проекту	15.03.2019 р.	
6	Висновки	05.04.2019 р.	

Студент

(підпис)

О.Л. Ренський

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Д.О.Гуменний

(ініціали, прізвище)

АНОТАЦІЯ

В даній роботі були розглянуті існуючі методи та підходи до проектування двоногих крокуючих роботів. Проведено дослідження сучасних методів управління рухом ДКР.

Розроблено математичну модель руху ДКР, що включає в себе формулювання і рішення задач прямої і зворотної кінематики, зворотної динаміки педипуляторів робота, задачу забезпечення руху робота з збереженням рівноваги. У виконанні завдання зворотної кінематики був використаний аналітичний спосіб знаходження кутів. Задача динаміки розглядалася для спрощеної моделі робота в сагітальній та фронтальній площинах з урахуванням фази опори на дві ноги. Як критерій збереження рівноваги руху робота використовувалося поняття точки нульового моменту. Розроблено програмний комплекс системи управління роботом на основі операційної системи ROS. Описано використання трьохсхового приводу у конструкції робота.

Ключові слова: робототехнічна система, двоногий крокуючий робот, двонога хода, управління стійкістю, рівновага антропоморфного крокуючого апарата, математична модель.

Розмір пояснювальної записки – 85 аркушів, містить 26 ілюстрацій, 26 таблиць, 5 додатків.

ABSTRACT

In this paper, existing methods and approaches to design have been considered twin walking robots. The research of modern methods of motion control of two-legged walking robots was conducted..

A mathematical model of the DKR movement, including one, is developed formulation and solution of problems of direct and reverse kinematics, reverse the dynamics of the work of the pedipulators, the task of ensuring the movement of work with maintaining equilibrium. In carrying out the task of reverse kinematics was used analytical method of finding angles. The task of the dynamics was considered for a simplified model of work in sagittal and frontal planes taking into account the phase of support on two legs. As a criterion for saving equilibrium motion of the robot used the concept of the point of zero moment. The software complex of the robot control system is developed based on the ROS operating system. Three-dimensional use is described drive in the design of the robot.

Key words: robotic system, two-legged walking robot, two-legged stroke, stability management, anthropomorphic equilibrium walking apparatus, mathematical model.

The size of the explanatory note is 85 pages, contains 26 illustrations, 26 tables, 5 applications.

Пояснювальна записка до магістерської дисертації

на тему: «Апаратно-програмний комплекс технічних засобів управління
рухом двоногого робота»

Київ 2019

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПІДХОДІВ ТА МЕТОДІВ.....	13
1.1 Огляд підходів.....	13
1.2 Експериментальний лабораторний стенд для моделювання двоногого крокуючого роботу.....	16
1.3 Формування траєкторії руху виконавчого механізму при ходьбі по горизонтальній площині.....	26
1.4. Стабілізація руху двоногого крокуючого робота управлінням моментами на стопах.....	28
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДВОНОГОЇ ХОДЬБИ РОБОТА.....	43
2.1 Біомеханіка антропоморфної ходьби і її перенесення на робота.....	44
2.2 Завдання прямої і зворотної кінематики робота.....	49
2.3 Критерій збереження рівноваги при двоногій ходьбі.....	53
2.4 Динаміка педіпуляторів.....	58
РОЗДІЛ 3. АПАРАТНА ЧАСТИНА УПРАВЛІННЯ ХОДЬБОЮ ДВОНОГОГО РОБОТА.....	61
3.1 Програмні засоби управління.....	61
3.2 Формалізація процесу управління антропоморфним крокуючим апаратом за критеріями розподілу сили реакції опорної поверхні.....	69
3.3 Застосування трьохосового приводу.....	70
3.4 Структурна формалізація системи управління стійкістю АКА на ОП	73
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....	75
4.1 Опис ідеї проекту.....	75
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	76
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	76
4.4 Розроблення ринкової стратегії стартап-проекту.....	81

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	82
4.6 Елементи фінансової підтримки стартапу та аналіз ризиків.....	84
ВИСНОВКИ.....	88
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	89
ДОДАТКИ.....	91

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ДКР	– двоногий крокуючий робот;
АКА	– антропоморфний крокуючий апарат;
ОРА	– опорно-руховий апарат;
ТЦМ	– точка центру мас;
ЕГСП	– електрогідравлічні слідкуючі приводи;
ТНМ	– точка нульового моменту;
ТЦМ	– точка центру мас;
ROS	– Robot Operating System;
IPM	– Inverted Pendulum Model;

ВСТУП

На сьогодні існує велика кількість задач та ситуацій що потребують від людей робіт у важких, небезпечних, часто несумісних з життям умовах. У відповідь з'являються нові засоби робототехніки. Як правило, для виконання завдань на земній поверхні це самохідне колісне або гусеничне шасі з встановленими на ньому маніпулятором, засобами спостереження або іншим обладнанням. Управління здійснюється дистанційно по радіо або кабелю, а живлення від акумуляторів або також по кабелю. Відповідні конструкції роботів вже відпрацьовані у виробництві протягом десятків років. За цей час колективами накопичений великий досвід по їх розробці та застосуванню, в ряді випадків досить ефективному[6]. Однак не можна заперечувати, що така техніка має (як і будь-яка інша) обмежені можливості і, відповідно, сфери застосування. Тому як і раніше люди, ризикуючи здоров'ям і життям, працюють в завалах, на пожежах, в умовах хімічного, біологічного та радіоактивного зараження, борються зі злочинцями і терористами. Причому, найчастіше все це відбувається не в полі, а в будівлях і різних спорудах, в приміщеннях і в кабінах різної техніки, тобто в умовах, спочатку створених для людини, з урахуванням його дворукості, двуногості, типових розмірів, маси і, якщо можна так сказати, кінематики тіла. З цієї причини розвиваються й інші напрямки екстремальної робототехніки.

У стані економічного спаду, що переживає на сьогодні Україна, виникає потреба у скороченнях витрат на підготовку середовища з одночасним збільшенням продуктивності праці. Особливо актуальним це питання постає у галузі видобування ресурсів, де часто виникає проблема забезпечення прохідності транспортних засобів[5].

Найбільш доцільним видається використання робототехнічного комплексу, що включає в себе антропоморфний двоногий крокуючий робот (ДКР) (або групу ДКР) і мобільний пост управління. ДКР повинен бути забезпечений автономним джерелом енергії, засобами зв'язку з постом управління, а також системою управління, що дозволяє виконувати деякі дії в супервизорному

або автоматичному режимі (наприклад самостійний вихід з місця робіт при відсутності зв'язку).

Стратегічним завданням при створенні подібних робототехнічних інтелектуальних систем є [1]:

- конструювання опорно-рухової системи (ОРА) антропоморфного крокуючого апарата (АКА);
- забезпечення дотримання усталеного положення АКА при статичному положенні його опорно-рухового апарата (ОРА);
- кероване переміщення центру мас апарата за програмованим законом руху;
- дотримання усталеного руху точки центру мас АКА у динамічних фазах руху;
- вибір типу постановки опори на опорну поверхню (ОП);
- вирішення задач оптимізації по енергоефективності руху;
- здійснення прогнозування переміщення центру мас та ланок апарата для запобігання його падінню;
- відновлення усталеного та прогнозованого стану АКА до стану з положення великого завалу ТЦМ;

Японія проявляє найбільшу активність в області створення антропоморфних крокуючих роботів і досягла в цій справі великих успіхів. Такі роботи ведуться в Токійському університеті, університеті Васеда спільно з фірмою "*Hitachi*", в Оксакском університеті, університеті м Шиба, біомедичних інженерному інституті, Токійському технологічному інституті і в інших організаціях. На початку 80-х створені роботи WL-9RD, WL-9RDmk1 1. Нарешті, всім відомий робот "*Asimo*" фірми *Honda* крім повноцінної динамічної ходьби, тобто руху з урахуванням інерційних властивостей виконавчого механізму ДШР, демонструє масу інших функцій (технічний зір,

синтез і розпізнавання мови, орієнтування в просторі), що роблять його не просто універсальною крокує машиною, а справжнім роботом.

Побудова антропоморфних крокуючих апаратів (АКА) залишається однією з актуальних задач сьогодення, вирішення якої матиме значний економічний та соціальний ефект завдяки потенційно більшій прохідності їх у порівнянні з будь-якими іншими апаратами. При тому технічна реалізація АКА ускладнена, насамперед, відсутністю систем управління (СУ), які б забезпечували їх рівновагу та враховували вплив навколишнього середовища.

Найбільший вклад у вивчення двоногого людиноподібного руху внесли *Chow C.K., Jakobson D.H., Hill J.C., Mc-Gee, Pei та Muybridge E.*

Так, у працях Chow C.K. і Jakobson D.H. забезпечення рівноваги АКА здійснюється шляхом застосування другої теореми Ляпунова. При цьому апарат розглядається як механічна система маятникового типу, визначена у двох площинах[4].

На сьогодні існує багато моделей руху крокуючих апаратів, що описують їх переміщення на однорідних поверхнях. Найбільш точні моделі описують крокуючий апарат як об'єкт з антропним принципом руху. Однак, подібна формалізація супроводжується ускладненням моделі та появою інваріантності у методах та моделях керування. Тому, з метою математичної наглядності, в більшості наукових праць розглядаються спрощені моделі руху, у яких процес руху та опис антропоморфного крокуючого апарата (АКА) здійснюється методами активної динаміки, які враховують роботу приводів та вплив гравітації як негативної складової керування. Очевидно, що такі моделі мають низьку енергоефективність, що суттєво впливає на можливість практичного їх застосування. У зв'язку з цим, виникає потреба використання зовнішніх сил, що діють на АКА, як ефективної складової керування[5].

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПІДХОДІВ ТА МЕТОДІВ

1.1. Огляд підходів.

На сьогоднішній день, існує декілька підходів до вирішення проблеми управління рухом двоногого робота. Задачі конструювання опорно-рухового апарата АКА залишаються областю досліджень механіки, біоніки та теоретичної механіки. На теперішній час наявні низка варіантів технічної реалізації штучної опорно-рухової системи для двоногого крокуючого апарата, в тому числі й антропоморфного типу. Значний внесок у конструювання подібних апаратів, що ґрунтуються на принципах будови та дії людського організму, зробили: *Christian Ott*, *Maximo A. Roa*, *Gerd Hirzinger* корпорації *DLR*; компанія *Boston Dynamics*; корпорація *Honda Motors*; корпорація *PAL Robotics*; об'єднання фінансово-економічної палати Японії (*METI*); палата розвитку нових енергетичних і промислових технологій (*NEDO*), корпорації *Kawada Industries* та *Iran`s Tehran University*. Зважаючи на великий досвід та напрацювання в області механіки, задача конструювання опорно-рухового апарата АКА є вирішеною, проте може бути цікавою з погляду проектування приводів, ідентичних за принципом роботи до м'язів людини [1].

Перші спроби математичної формалізації кінематики АКА описані ще у роботах В.В. Белецького. Подальше розширення функціональних можливостей АКА призвело до зростання вимог до їх кінематичних схем, у результаті чого на сьогодні існує декілька класифікацій кінематичних схем, розроблених такими вченими, як *T. McGeer*, *W. Blajer*, В. Тимошенко, *S. Gruber*, *L. Yang*, *D. Braun*. Спільною рисою їхніх робіт є вирішення таких задач механіки, як: проковзування на опорній поверхні, переміщення ланок, подання апарата у вигляді оберненого маятника, аналіз моментів та інерції у шарнірах. Однак, жодної придатної для моделювання кінематичної моделі дотримання рівноваги АКА на опорній поверхні, за даними про розподіл сил реакції опори, побудовано не було [2].

Вперше проблема достовірного відтворення кінематичної і динамічної моделей АКА була розглянута у працях *Muybridge E.*, який застосував метод кінограми руху для фіксації та спостереження циклічної зміни фаз людської ходи. Подальший розвиток даної проблеми знайшов своє відображення у публікаціях таких авторів, як: *McGeer T., Frank A., Pai A., Chow C., Jacobson D.*. Так, зокрема, у публікації показано побудову кінематичної моделі крокуючого апарата з невагомими одноланковими опорами та сектороподібними ланками стоп, що взаємодії його з ОП без врахування сили тертя та сили реакції ОП. Найбільш успішними прикладами формалізації динамічної моделі АКА є моделі, запропоновані такими авторами: Веліченко В.В. , Артоболевський І.І. , Бернштейн Н.А. , *Muybridge E., Tomovic R., McGee R., McGeer T., Frank A., Pai A., Chow C., Jacobson D., Vukobratovic M., Chemori A., S. Le Flock, S. Krut, E. Dombre* та інші.

Так, у роботі авторами *Chemori A., S. Le Flock, S. Krut, E. Dombre* показано побудову і застосування кінематичної моделі АКА, яка налічує 12 твердих ланок. Для управління даною моделлю, значення кутів задаються у вигляді вектора управління $X \in R^{18}$. Тоді як, сама модель описується вектором $X_{tags} = f(q); q \in R^{18}; X_{tags} \in R^{45}$, а її зворотня модель (простір станів) подається так: $q = f^{-1}(X_{tags}); q \in R^{18}; X_{tags} \in R^{45}$.

Кутове переміщення у тазостегновому шарнірі задається трьома ступенями свободи, гомілко-стегновому шарнірі — однією ступенню свободи, а у гомілко-стоповому шарнірі – двома ступенями свободи. Особливістю цієї моделі є наявна група шарнірів *Position, Orientation*, які задають кутове та лінійне положення АКА відносно опорної поверхні[3].

На основі запропонованої кінематичної моделі, авторами побудовано динамічну модель апарату, яка задана рівняннями Лагранжа у такому вигляді:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Su,$$

де: $q = [q_1, \dots, q_{12}, \omega_x, \omega_y, \omega_z, T_x, T_y, T_z]^T \in R^{18}$ – вектор узагальнених координат; $M(q) \in R^{18 \times 18}$ – матриця інерції ланок; $C(q, \dot{q}) \in R^{18 \times 18}$ – матриця Коріолісових та доцентрових прискорень; $G(q) \in R^{18}$ – вектор сили тяжіння; $u \in R^{12}$ – вектор вхідних кутових впливів; $S \in R^{18 \times 12}$ матриця розподілу кутових моментів шарнірів.

У випадку дотику ланки (ланок) до ОП рівняння динаміки моделі АКА задається таким чином:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Su + J(q)^T \lambda,$$

де λ і $J(q)$ – відповідно Лагранжеві множники та матриця Якобіанів. У роботі авторів *Huu T.D., Cuong N.C., Phuong N.T.* кінематична модель апарата має 10 ступенів свободи і складається з 8 ланок, серед яких ланка *TorsoC* задає тулуб апарата, ланка *BK* визначає таз, ланки *KK_l*, *BB_l* задають стегна АКА, а ланки *K_l*, *E*, *B_l*, *B₂* задають його гомілки.

Кожна з ланок моделі АКА характеризується масою та довжиною, що задаються за допомогою параметрів m , l – відповідно.

Кінематична взаємодія ланок задається координатами точок, що формують відповідні ланки, а сама модель задається кутами: $[\Theta_1, \dots, \Theta_{10}]$, де: $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_{10}, \Theta_9$ – кути між стопою та гомілкою у площинах Z та X правої і лівої ноги – відповідно; Θ_3, Θ_8 – кути між гомілками та стегном для правої і лівої ноги – відповідно; $\Theta_4, \Theta_5, \Theta_6, \Theta_7$ – кути повороту ланок стегон у площинах X та Y правої і лівої ноги – відповідно.

Статичне положення моделі визначається координатами точки центру тазу:

$$x_{ca} = l_1 \sin \Theta_1 - l_2 \sin (\Theta_3 - \Theta_1)$$

$$y_{ca} = l_1 \sin (\Theta_2) + l_2 \cos (\Theta_3 - \Theta_1) \sin (\Theta_2) + \frac{l_3}{2} \cos (\Theta_3 + \Theta_4)$$

$$z_{ca} = l_1 \cos (\Theta_1) \cos (\Theta_2) + l_2 \cos (\Theta_3 - \Theta_1) \cos \Theta_2 - \frac{l_3}{2} \sin (\Theta_2 + \Theta_4),$$

а положенням точки центру мас (ТЦМ):

$$x_{com} = \frac{m_b x_b + m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_c x_c + m_3 x_3 + m_4 x_4 + m_e x_e}{m_b + m_1 + m_2 + m_c + m_3 + m_4 + m_e},$$

$$y_{com} = \frac{m_b y_b + m_1 y_1 + m_2 y_2 + m_c y_c + m_3 y_3 + m_4 y_4 + m_e y_e}{m_b + m_1 + m_2 + m_c + m_3 + m_4 + m_e},$$

$$z_{com} = \frac{m_b z_b + m_1 z_1 + m_2 z_2 + m_c z_c + m_3 z_3 + m_4 z_4 + m_e z_e}{m_b + m_1 + m_2 + m_c + m_3 + m_4 + m_e},$$

де m – маси, зосереджені у шарнірах кінематичних пар. Основуючись на даній моделі, авторами роботи побудовано модель динаміки апарата, яка описана рівняннями Лагранжа у такому вигляді:

$$m = \begin{pmatrix} x_{ca}'' \\ y_{ca}'' \\ z_{ca}'' \end{pmatrix}$$

де J — матриця Якобіанів, що задана так:

$$J = \frac{dp}{dq} = \begin{pmatrix} 0 & rC_p & S_p \\ -rC_r & 0 & -S_r \\ \frac{-rC_r S_r}{D} & \frac{-rC_p S_p}{D} & D \end{pmatrix};$$

а рівняння динаміки у площині x АКА подано так:

$$m(-z_{ca} \ddot{y}_{ca} + y_{ca} \ddot{z}_{ca}) = \tau_x - mgy_{ca}, \tau_x \equiv \frac{D}{C_r} \tau_r.$$

Аналогічним чином описані рівняння динаміки, що задають рух АКА у площинах y і z .

1.2. Експериментальний лабораторний стенд для моделювання двоногого крокуючого роботу

Цікавим з технічної точки зору є проект *ASIMO* (скорочення від *Advanced Step in Innovative MObility*) – робот-андроїд, створений у корпорації *Honda Motor Company* в Центрі Фундаментальних Технічних Досліджень Вако (Японія). Остання версія робота, випущена в 2014 році, має зріст 130 см, масу 50 кг і здатність пересуватися зі швидкістю до 7 км / год (Рисунок 1.1).

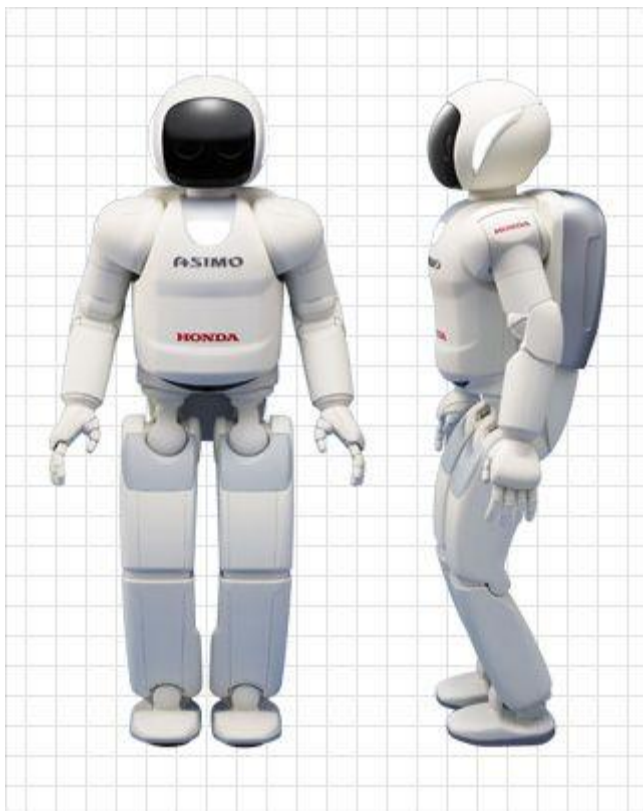


Рисунок 1.1 – Робот-андроїд *ASIMO* корпорації *Honda Motor Company*

Для визначення локалізації суглобів ноги у якості прикладу був використаний скелет людини. У ході проведених досліджень було визначено вплив пальців на функцію ходьби і стало зрозуміло, що місце, де прикріплені пальці і розташований шарнірний суглоб, було дуже важливим для виявлення того, як підтримується вага робота. Контактні відчуття з опорної поверхні надходять до нижніх суглобів. Оскільки шарнір ноги повертається спереду назад і зліва направо, спостерігається стабільність у поздовжньому напрямку під час нормальної ходьби, і при перетині нахилу під кутом збільшується відчуття зміни поверхні в бічному напрямку. Колінний суглоб і тазостегновий суглоб необхідні для сходження і спуску по сходам, а також для розведення ніг. Роботу було надано багато спільних з будовою скелету людини рис, таких як кульшові суглоби, колінні суглоби і суглоби стоп [6].

Дослідження ходьби двоногих роботів проводились і у інших наукових установах. Розрахунки, проведені у ході робіт над створенням крокуючого апарату у Московському державному технічному університету ім. М. Е. Баумана, показують, що для створення двоногих крокуючих роботів (ДКР) великих розмірів і мас найбільш прийнятним є застосування гідроприводу [8].

Це обумовлено тим, що гідропривід має велику енергоємністю і можливістю працювати в області малих змін узагальнених координат, характерних для ходьби ДКР. Разом з тим, застосування гідроприводу накладає певні обмеження, як при конструюванні виконавчого механізму, так і при формуванні законів управління рухом ДКР.

Для проведення науково-дослідних робіт, спрямованих на вивчення руху ДКР, оснащеного електрогідравлічними слідкуючими приводами (ЕГСП), був створений лабораторний дослідницький стенд ДКР. Висота виконавчого механізму ДШР (Рисунок 1.2) становить 2.2 м., вага - 220 кг

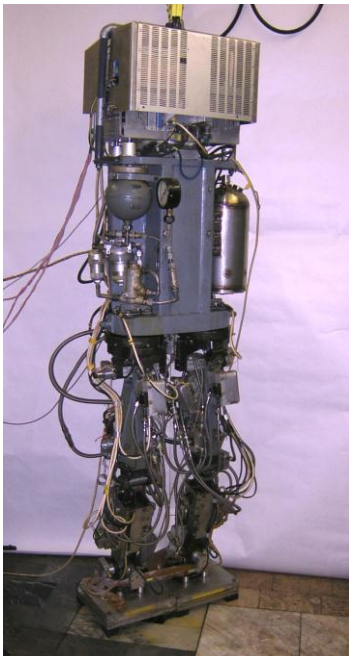


Рисунок 1.2 – Лабораторний ДКР (вид спереду)

Виконавчий механізм робота складається з корпусу і двох ніг, має 12 ступенів рухливості, оснащених ЕГСП. В якості виконавчих гідродвигунів використовуються гідроциліндри з непрохідними штоками.

Потоками рідини в порожнині гідроциліндрів керують електрогідравлічні підсилювачі типу сопло-заслінка-золотник. Як датчики кута повороту в усі шарніри виконавчого механізму встановлені синусно-косинусні обертові трансформатори, що працюють в режимі фазообертачів. У корпусі ДКР розміщені насосна станція і апаратура системи управління.

Зверху, на корпусі робота, на віброізольованій платформі встановлені датчики системи орієнтації: три гіроскопічних датчика кутової швидкості і три маятникових акселерометра. В стопи ніг вбудовані силометричні датчики. Знизу на стопах, для збільшення піддатливості, закріплені гумові накладки. Енергоживлення здійснюється по кабелю від зовнішнього джерела трифазного напруги (200 В, 400 Гц.).

Програмна частина системи управління лабораторного ДКР реалізується на базі персональних ЕОМ з операційною системою реального часу. Система управління ДКР вирішує «різнопланові» завдання - формування траєкторії руху, управління електрогідравлічними приводами, реєстрація експериментальних даних і т.д. Для її реалізації авторами був розроблений оригінальний програмний комплекс системи управління, що дозволяє розподіляти розробку програмних модулів між окремими фахівцями, а їх виконання - між декількома ЕОМ. На лабораторному стенді ДКР програмне забезпечення системи управління виконується на трьох спільно працюючих ЕОМ, об'єднаних в локальну мережу Ethernet. На рисунку 1.3 показана структура програмного комплексу системи управління ДКР. Логічно відокремлені завдання управління роботом розробляються і оформляються у вигляді окремих програмних модулів, які операційна система виконує як незалежні процеси. Функції забезпечення взаємодії окремих програмних модулів (обмін даними, командами, синхронізація роботи) в рамках всієї

мережі ЕОМ, на яких виконуються програмні модулі системи управління, покладаються на спеціальний процес-транспорт. Взаємодія програмних модулів через процес - транспорт здійснюється за допомогою єдиних протоколів обміну даними і командами.

Автори розробили імітаційну математичну модель виконавчого механізму, що є частиною програмного комплексу системи управління ДКР.

Програмний комплекс ДКР, побудований таким чином, що може працювати як з реальним виконавчим механізмом, так і з його математичною моделлю (структура і параметри системи управління при цьому не змінюються). це значно розширило можливості проведення дослідницьких робіт і дозволило проводити настройку регуляторів гідроприводів, системи стабілізації, а також синтез траєкторії руху виконавчого механізму шляхом чисельного моделювання роботи виконавчого механізму.

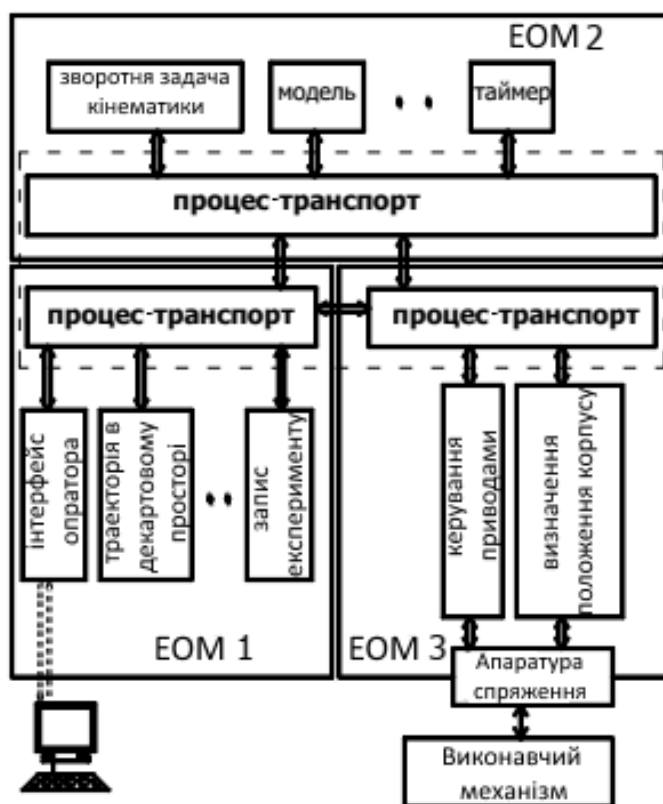


Рисунок 1.3 – Структура програмного комплексу системи управління ДКР

Математичне моделювання руху виконавчого механізму ДКР

Виконавчий механізм ДКР не закріплений на нерухомому підставі. Для математичного опису його положення в навколишньому просторі були введені фіктивні ланки з трьома поступальними і трьома обертовими зчленуваннями, що з'єднують нерухому абсолютну систему координат з корпусом робота [9]. На рисунку 1.4 наведена кінематична схема виконавчого механізму ДКР з фіктивними ланками, а також розташування пов'язаних систем координат.

Кінематична схема ДКР є розгалуженою, що викликає певні складнощі при описі кінематики і динаміки робота, а також при формуванні законів управління його рухом.

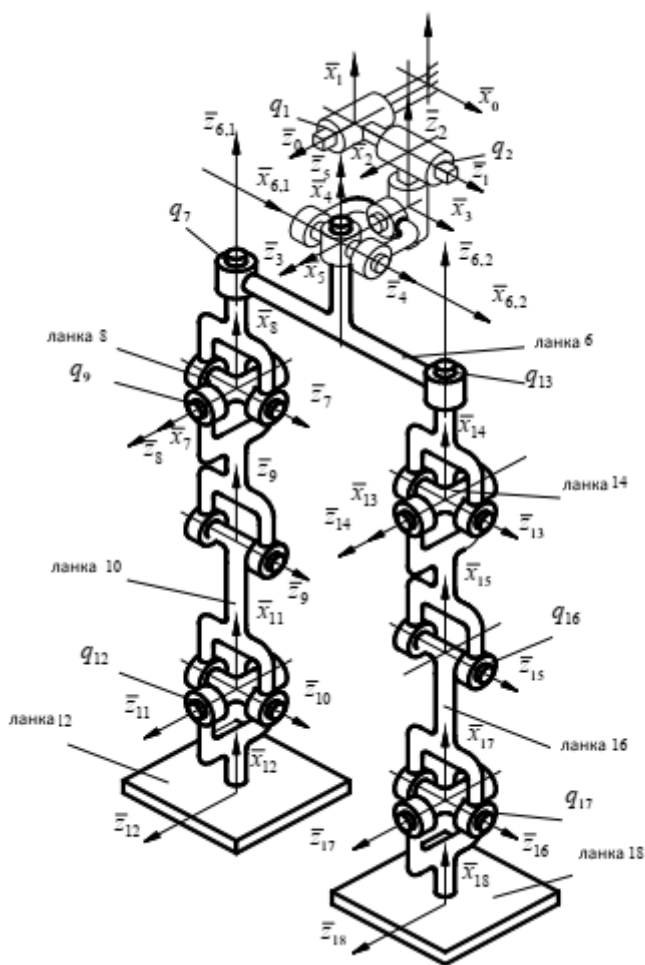


Рисунок 1.4 – Кінематична схема ДКР і призначення пов'язаних систем координат

Математична модель виконавчого механізму, що враховує особливості його кінематичної структури, отримана з використанням методики складання блочно-матричних математичних моделей виконавчих механізмів, що мають розгалужену кінематичну структуру.

Представляючи кінематичну схему виконавчого механізму у вигляді деревовидного орієнтованого графа (Рисунок 1.5) і вводячи певні позначення і функції для опису кінематичних і масогабаритних параметрів ланок, записуємо рівняння руху виконавчого механізму робота з розгалуженою кінематичною структурою

$$A(q) \cdot \ddot{q} + B(q, \dot{q}) - C(q) \cdot {}^0 f_b - H(q) \cdot {}^0 n_b = \tau, \quad (1)$$

де q - вектор узагальнених координат виконавчого механізму;

τ - вектор сил, моментів, що розвиваються приводами робота;

${}^0 f_b$, ${}^0 n_b$ - блокові матриці зовнішніх сил і моментів, прикладених до ланок з боку навколишнього середовища;

$A(q)$, $B(q, \dot{q})$, $C(q)$ і $H(q)$ - матричні коефіцієнти, що обчислюються відповідно до нижче наведених залежностей.

$$\begin{aligned} A(q) = & \sigma \cdot ({}^0 z^d)^T \cdot \left(-(\Lambda({}^0 c_{fD}))^T \cdot m^d \cdot (D \cdot {}^0 z^d \cdot (E - \sigma) + \Lambda^T({}^0 c_{fD}) \cdot z^d \cdot \sigma) \right. \\ & + D^T \cdot {}^0 J_C^d \cdot D \cdot {}^0 z^d \cdot \sigma + (E - \sigma) \cdot ({}^0 z^d)^T \cdot D^T \cdot m^d \cdot (D \cdot {}^0 z^d \cdot (E - \sigma) + \\ & \left. + \Lambda^T({}^0 c_{fD}) \cdot {}^0 z^d \cdot \sigma) \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B(q, \dot{q}) = & \sigma \cdot ({}^0 z^d)^T \cdot \left\{ -(\Lambda({}^0 c_{fD}))^T \cdot m^d \cdot \left[\Lambda^T({}^0 c_{fD}) \cdot \Lambda^T({}^0 z^d \cdot \sigma \cdot \dot{q}^d) \cdot \right. \right. \\ & (D - E) + \Lambda^T(\Lambda^T({}^0 c_{fD}) \cdot \sigma \cdot \dot{q}^d \cdot {}^0 z^d \cdot D + \Lambda^T({}^0 c_{fD}) \cdot ((D - E) \cdot \sigma \cdot {}^0 z^d \cdot \\ & \left. \dot{q}^d)^d) + 2 \cdot D \cdot \Lambda^T({}^0 z^d \cdot (E - \sigma) \cdot \dot{q}^d) \cdot (D - E) \right] + D^T \cdot {}^0 J_C^d \cdot D \cdot \sigma \cdot \dot{q}^d \cdot \Lambda^T({}^0 z^d) \cdot \\ & \left. (D - E) + D^T \cdot \Lambda(D \cdot {}^0 z^d \cdot \sigma \cdot \dot{q}^d)^d \cdot {}^0 J_C^d \cdot D \right\} \cdot {}^0 z^d \cdot \sigma \cdot \dot{q} + (E - \sigma) \cdot ({}^0 z^d)^T \cdot D^T \cdot \end{aligned}$$

$$m^d \cdot \left[\Lambda^T({}^0c_{fD}) \cdot \Lambda^T({}^0z^d \cdot \sigma \cdot \dot{q}^d) \cdot (D - E) + 2 \cdot D \cdot \Lambda^T({}^0z^d \cdot (E - \sigma) \cdot \dot{q}^d) \cdot (D - E) + \Lambda^T \left(\Lambda^T({}^0c_{fD}) \cdot \sigma \cdot \dot{q}^d \cdot {}^0z^d \cdot D + \Lambda^T({}^0c_{fD}) \cdot ((D - E) \cdot \sigma \cdot {}^0z^d \cdot \dot{q}^d) \right) \right] \cdot {}^0z^d \cdot \sigma \cdot \dot{q};$$

$$C(q) = \sigma \cdot ({}^0z^d)^T \cdot \left((D^T - E) \cdot \Lambda({}^0s^d) \cdot D^T + D^T \cdot \Lambda({}^0t^d) \right) + (E - \sigma) \cdot ({}^0z^d)^T \cdot D^T;$$

$$H(q) = \sigma \cdot ({}^0z^d)^T \cdot D^T$$

Як видно зі структури отриманого рівняння руху виконавчого механізму, воно є розвитком аналогічних рівнянь, наведених у роботах Зенкевича С.Л., Ющенко А.С., Лєскова А.Г., виведених для виконавчих механізмів з простим кінематичним ланцюгом.

Для того, щоб це блочно-матричне рівняння динаміки виконавчого механізму, що має деревоподібну кінематичну структуру, описувало рух розглянутого в даній статті двоногого крокуючого робота, використовуємо позначення, наведені в роботі Ковальчука А.К., Кулакова Д.Б., Семенов С.Є. «Блочно-матричні рівняння руху виконавчих механізмів роботів з деревовидною кінематичною структурою», і представляємо необхідні параметри виконавчого механізму в блочно-матричному вигляді.

Матриця досяжності ланок виконавчого механізму D , що описує взаємне розташування ланок виконавчого механізму РМ (Рисунок 1.4):

$$D_{18 \times 18} = \begin{pmatrix} U_{6 \times 6} & \Theta_{6 \times 6} & \Theta_{6 \times 6} \\ I_{6 \times 6} & U_{6 \times 6} & \Theta_{6 \times 6} \\ I_{6 \times 6} & \Theta_{6 \times 6} & U_{6 \times 6} \end{pmatrix},$$

$$\text{де } U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix};$$

I - матриця, всі елементи якої дорівнюють 1;

Θ - нульова матриця.

Матриця z , яка визначає напрямки осей пов'язаних систем координат ДКР і їх взаємне розташування:

$${}^0z = ({}^0\bar{z}_0, {}^0\bar{z}_1, {}^0\bar{z}_2, {}^0\bar{z}_3, {}^0\bar{z}_4, {}^0\bar{z}_5, {}^0\bar{z}_{6,1}, {}^0\bar{z}_7, {}^0\bar{z}_8, {}^0\bar{z}_9, {}^0\bar{z}_{10}, {}^0\bar{z}_{11}, {}^0\bar{z}_{6,2}, {}^0\bar{z}_{13}, {}^0\bar{z}_{14}, {}^0\bar{z}_{15}, {}^0\bar{z}_{16}, {}^0\bar{z}_{17})^T$$

Матриця коефіцієнтів, що визначають типи зчленування ланок ДКР має вид:

$$\sigma^d = \text{diag}(0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad \dots \quad 1)$$

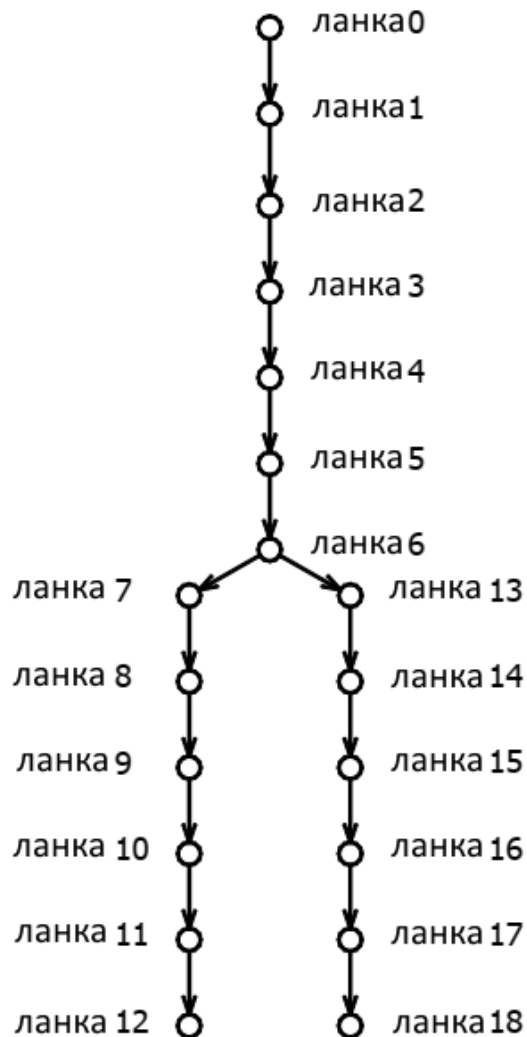


Рисунок 1.5 – Каскадний граф, що представляє кінематичну структуру виконавчого механізму ДКР

Крім цього визначаються наступні матриці:

$m = (m_1, m_2 \dots m_{18})^T$ – матриця мас ланок виконавчого механізму ДКР;

$J = (J_{c_1}, J_{c_1} \dots J_{c_{18}})^T$ – блокова матриця тензорів інерції ланок;

${}^0t^d = \text{diag}({}^0\bar{t}_1^T \quad {}^0\bar{t}_2^T \quad \dots \quad {}^0\bar{t}_{18}^T)$ – блокова діагональна матриця векторів, що з'єднують початки відповідних систем координат батьківських ланок з точками, через які проходять рівнодіючі зовнішніх сил, прикладених до ланок.

Моделювання зв'язків, що накладаються на стопи ДКР з боку опорної поверхні, здійснюється шляхом визначення сил та моментів, що діють на стопи з боку пружних елементів, через які робот контактує з опорною поверхнею. Ці сили і моменти при математичному моделюванні визначаються як функції від розрахованих лінійної і кутової деформації кожного з пружних елементів стоп. При цьому враховуються такі особливості:

- сили і моменти, що діють з боку пружних елементів на стопи ДШР (виникають тільки при контакті відповідного пружного елемента з опорною поверхнею);
- сили, що діють з боку опорної поверхні на пружні елементи стоп (обмежені відповідно до максимальних сил тертя).

Певні сили і моменти враховуються в рівнянні динаміки виконавчого механізму (1) в якості зовнішніх сил і моментів, що діють на стопи ДШР (ланки 12 і 18 кінематичної структури виконавчого механізму ДКР, представленої на Рисунку 1.4).

Значення компонент вектора τ сил і моментів, що розвиваються приводами, (1) визначаються шляхом математичного моделювання роботи ЕГСП. Крім основних особливостей роботи таких приводів враховувалися нелінійності,

обумовлені мікрогеометрією золотникових пар електрогідравлічних підсилювачів[8].

1.3.Формування траєкторії руху виконавчого механізму при ходьбі по горизонтальній площині

Траєкторія руху виконавчого механізму ДКР формується у вигляді періодичних циклів руху, описуваних кусково гармонійними функціями з малим числом змінних параметрів. Це дозволяє проводити її формування і оптимізацію з використанням імітаційної математичної моделі робота [9].

Положення ДКР в декартовому просторі в кожен момент часу визначається 11-ти мірним вектором положення \bar{S}

$$\bar{S} = (x_{cm}, y_{cm}, z_{cm}, \alpha_{cm}, \beta_{cm}, \gamma_{cm}, x_{cm}, y_{cm}, z_{cm}, \alpha_{cm}, \beta_{cm}, \gamma_{cm}) \quad (2)$$

де $(x_{cm}, y_{cm}, z_{cm})^T$ – координати початку системи координат переноситься стопи в абсолютній системі координат;

$(\alpha_{cm}, \beta_{cm}, \gamma_{cm})^T$ – кути орієнтації переносимої стопи в абсолютній системі координат;

$(x_{cm}, y_{cm})^T$ – проекція центру мас ДКР на площину OXY абсолютної системи координат;

$(\alpha_k, \beta_k, \gamma_k)^T$ – кути, що визначають орієнтацію корпусу робота.

Зміни в часі значень кожної з компонент вектора положення (2) визначаються однотипними функціями з відповідними кожному компоненту параметрами

$$\Delta s_i(\tau_{s_i}) = A_{s_i} \cdot (1 - \cos(\omega_{s_i} \cdot \tau_{s_i})), \quad (3)$$

де τ_{s_i} – відносний час зміни і-ї компоненти вектора положення $0 < \tau_{s_i} < T_i$;

T_i – час, за який i -а компонента вектора положення повинна змінитися на величину A_{S_i} .

На рисунку 1.6 показані графіки змін компонент вектора положення виконавчого механізму ДКР в декартовому просторі відповідно до рівняння (3), що забезпечують його ходьбу по горизонтальній площині.

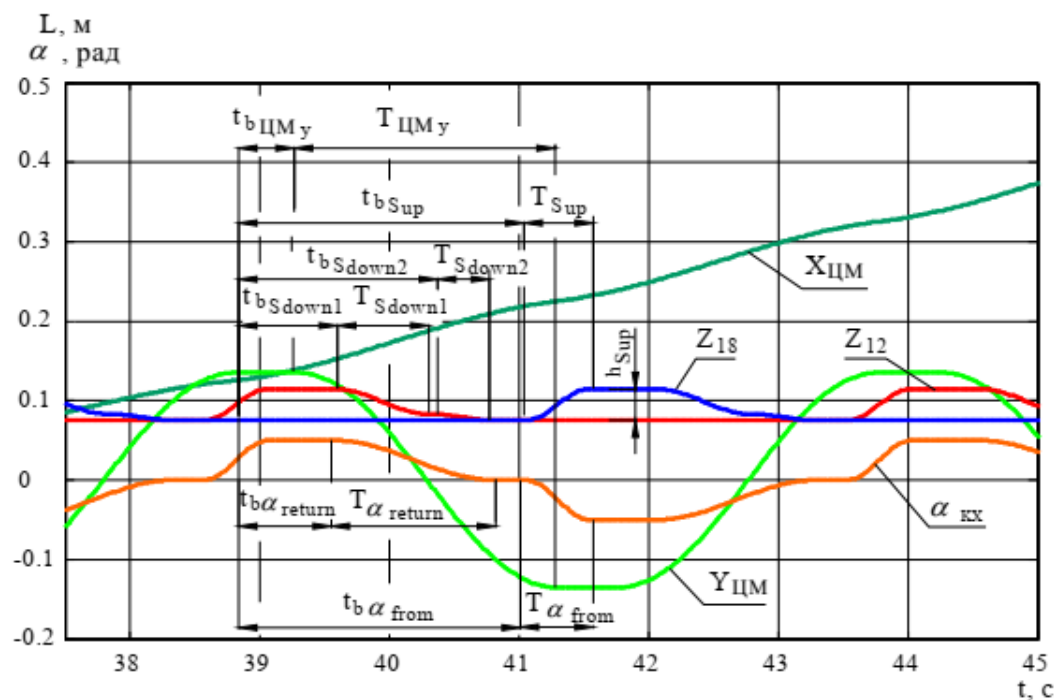


Рисунок 1.6 – Зміни компонент вектора положення ДКР у часі

Умовні позначення, наведені на рисунку 1.6, позначають наступне:

$X_{\text{ЦМ}}, Y_{\text{ЦМ}}$ – координати центру мас робота;

Z_{12}, Z_{18} – координати з початків систем координат стоп в абсолютній системі координат;

$\alpha_{\text{КХ}}$ – кут нахилу корпусу у фронтальній площині;

$t_{b\text{ЦМ}y}$ і $T_{\text{ЦМ}y}$ – момент початку поперечного руху центру мас робота і тривалість руху центру мас робота;

$t_{b\text{Sup}}$ і T_{Sup} – час початку і тривалість фази підйому лівої стопи;

$t_{bS_{down1}}$ і $T_{S_{down1}}$ – час початку і тривалість фази швидкого опускання правої стопи;

$t_{bS_{down2}}$ і $T_{S_{down2}}$ – час початку і тривалість фази уповільненої опускання правої стопи;

$t_{b\alpha_{from}}$ і $T_{\alpha_{from}}$ – час початку і тривалість фази коригуючого нахилу корпусу;

$t_{b\alpha_{return}}$ і $T_{\alpha_{return}}$ – час початку і тривалість фази повернення корпусу до вертикального положення;

h_{Sup} – величина підйому переносимої стопи.

Таким чином, траєкторія на кінцевих відрізках часу стає функцією відносно невеликого числа параметрів, за якими її можна тим або іншим способом коригувати і оптимізувати з використанням імітаційної математичної моделі робота, а також за результатами експерименту. При формуванні програмної траєкторії руху виконавчого механізму лабораторного ДКР, розробленого авторами, як критерій якості синтезованої траєкторії руху були обрані функції моментів на стопах робота, які за абсолютною величиною повинні бути мінімальними. Це забезпечує "запас на стабілізацію" по моментам на стопах, необхідний для утримання робота на обраній траєкторії в процесі ходьби.

1.4. Стабілізація руху двоногого крокуючого робота управлінням моментами на стопах

Під час руху ДКР неминуче виникають відхилення від розрахункових траєкторій. Це відбувається, в тому числі, з наступних причин:

- алгоритм розрахунку траєкторії використовує спрощену модель динаміки робота;
- під час руху на робот діють різні невраховані сили;
- опорна поверхня має форму, відмінну від прийнятої в моделі;
- приводи мають обмежену динамічну точність.

Стабілізація руху виконавчого механізму ДКР здійснюється шляхом введення додаткового відхилення корпусу від спочатку розраховується положення і шляхом управління моментами на стопах ДКР в процесі ходьби робота. Сили інерції, що виникають при відхиленні корпусу компенсують сили інерції обумовлені підйомом і опусканням яку переносять ноги. Кероване зміна моментів між стопами ДКР і опорною поверхнею направлено на зменшення помилки між заданим і вимірним кутовими положеннями корпусу. Відхилення корпусу здійснюється за законом (3), параметри якого визначаються на етапі формування траєкторії руху виконавчого механізму (Рисунок 1.6). Управління моментами на стопах здійснюється в стежить режимі відповідно до структурної схеми, наведеної на рис. 6. Умовні позначення, наведені на цьому малюнку, означають наступне:

ВМ - виконавчий механізм ДКР;

СМД - силомоментні датчики стоп;

СО - система орієнтації ДКР;

\bar{q} - вектор узагальнених координат ДКР

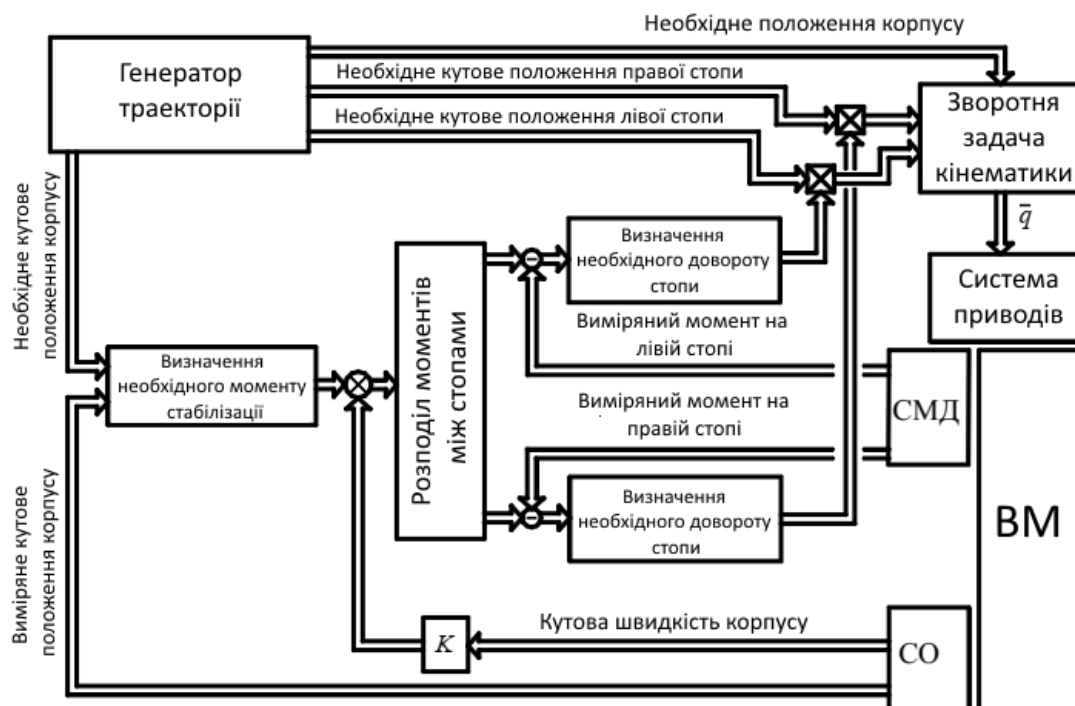


Рисунок 1.7 – Структура системи стабілізації шляхом управління моментами на стопах

Синтез стійкого руху двоногого крокуючого робота проводиться в наступній послідовності:

- формується програмна траєкторія руху ДКР в декартовому просторі з необхідними компенсаційними відхиленнями корпусу (на імітаційній математичній моделі виконавчого механізму);
- в процесі ходьби ДКР по неузгодженості між заданим і вимірним кутовими положеннями корпусу визначається необхідний зовнішній момент, який повинен бути прикладений до виконавчого механізму ДКР для повернення корпусу на розраховану траєкторію руху;
- визначаються додаткові зміни кутових положень стоп (щодо розрахованих відповідно до програмної траєкторією руху), необхідні для створення необхідного стабілізуючого моменту;
- визначаються відповідні їм значення узагальнених координат, які відпрацьовуються електрогідравлічними стежать приводами замкнутими зворотними зв'язками по положенню.

Експериментальне дослідження руху виконавчого механізму

Працездатність, описаних вище методів формування траєкторії руху виконавчого механізму ДШР при його ходьбі по горизонтальній площині з використанням системи стабілізації, що використовує управління моментами на стопах, була підтверджена експериментально на лабораторному стенді ДКР (Рисунок 1.2). На рисунках 1.8 і 1.9 наведені графіки змін кутового положення корпусу (заданого і виміряного) і вертикальних складових сил, що діють на стопи ДКР з боку опорної поверхні, при ходьбі ДКР по горизонтальній площині. Рисунок 1.8 відповідає роботі експериментального комплексу з імітаційної математичної моделлю виконавчого механізму, рисунок 8 - з реальним виконавчим механізмом.

Умовні позначення, наведені на рисунках 1.8 і 1.9, позначають наступне:

z_{12} , z_{18} – програмні значення висот підйому правої і лівої стоп робота;

$F_{z_{12}}, F_{z_{18}}$ – вертикальні сили на правій і лівій стопах робота, що виникають в процесі ходьби;

$\alpha_{x_{тр}}, \alpha_{y_{тр}}$ – програмні значення кутів нахилу корпусу навколо осей X і Y;

$\alpha_{x_{вим}}, \alpha_{y_{вим}}$ – виміряні значення кутів нахилу корпусу навколо осей X і Y.

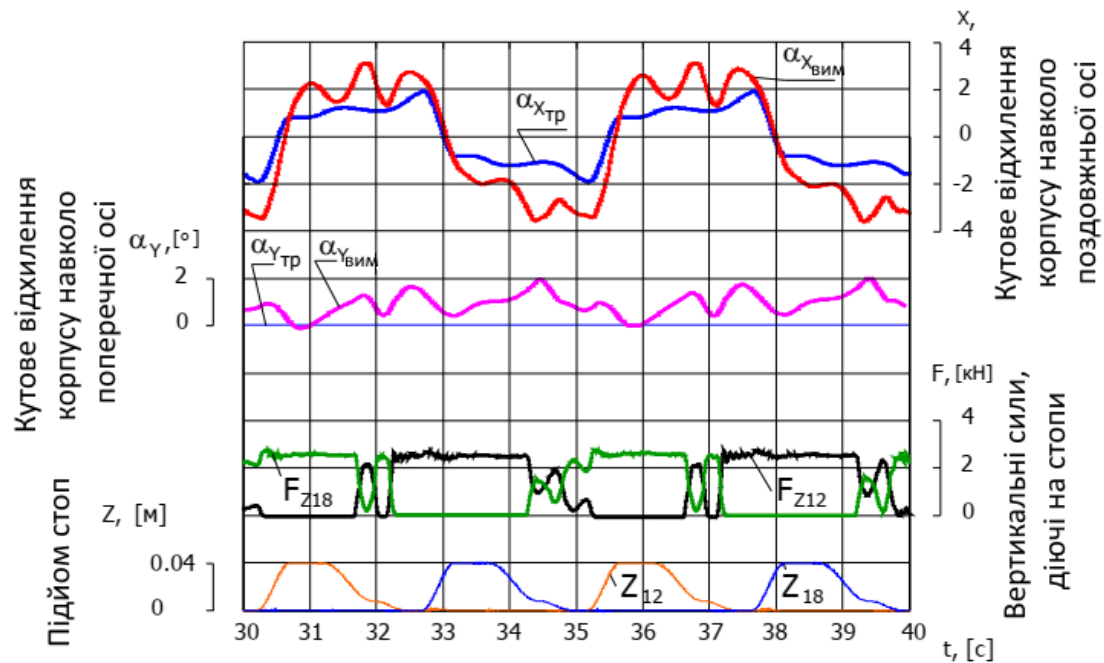


Рисунок 1.8 – Моделювання руху ДКР в режимі динамічної ходьби

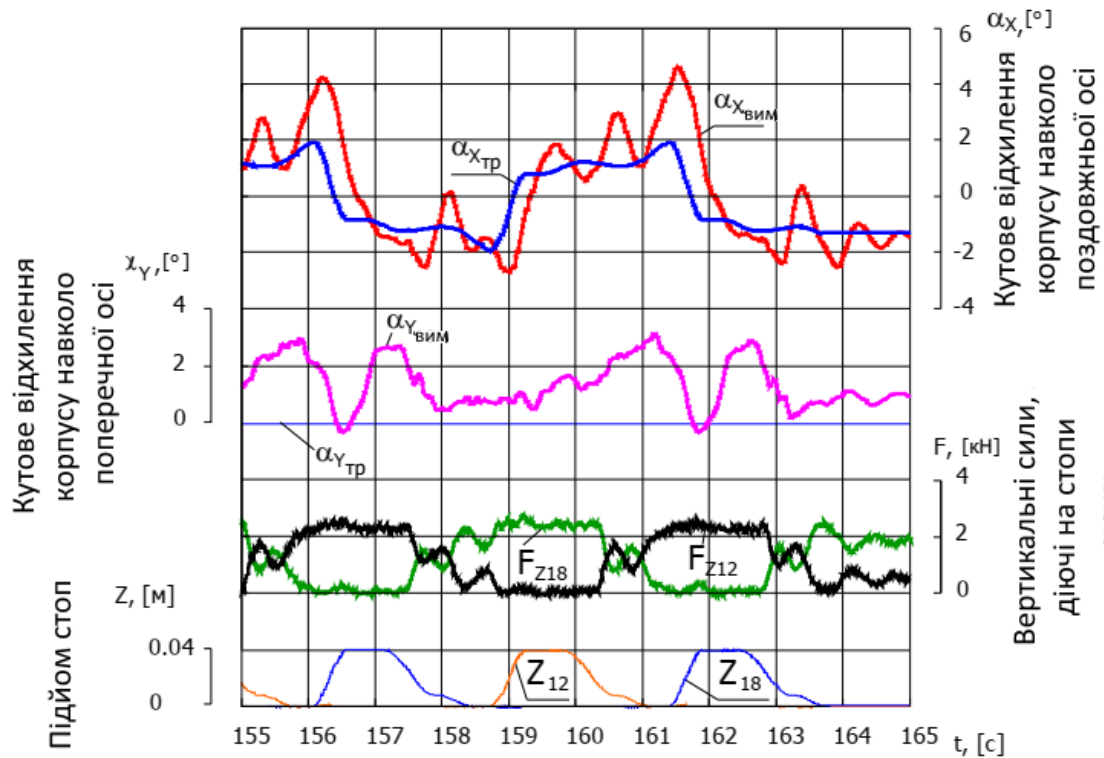


Рисунок 1.9 – Експериментальна динамічна ходьба ДКР

Розроблені і реалізовані авторами алгоритми формування траєкторії руху виконавчого механізму ДКР, оснащеного електрогідравлічними приводами, забезпечують стійку ходьбу робота по горизонтальній площині.

Застосування розробленої математичної моделі виконавчих механізмів роботів з деревовидної кінематичної структурою, для формування траєкторії руху ДКР показало її адекватність реальному лабораторному макету, що дозволяє синтезувати управління рухом виконавчого механізму ДКР.

На сьогодні існує багато моделей руху крокуючих апаратів, що описують їх переміщення на однорідних поверхнях. Найбільш точні моделі описують крокуючий апарат як об'єкт з антропним принципом руху.

Однак, подібна формалізація супроводжується ускладненням моделі та появою інваріантності у методах та моделях керування.

Тому, з метою математичної наочності, в більшості наукових праць розглядаються спрощені моделі руху, у яких процес руху та опис антропоморфного крокуючого апарата (АКА) здійснюється методами активної динаміки, які враховують роботу приводів та вплив гравітації як негативної складової керування. Очевидно, що такі моделі мають низьку енергоефективність, що суттєво впливає на можливість практичного їх

застосування. У зв'язку з цим, виникає потреба використання зовнішніх сил, що діють на АКА, як ефективної складової керування. Але методика керування АКА, в цьому випадку, описана не у повній мірі[5].

Так, залишаються не вирішеними задачі керування рухом АКА по похилій або неоднорідній поверхні та забезпечення його стійкості.

В момент зіткнення АКА зазнає колізії у керуванні, що може призвести до порушення циклу його руху або втрати рівноваги. Одним з можливих методів мінімізації впливу даного фактору на систему керування АКА є розробка додаткового регулятора, на базі моделі керування, для випадків

переміщення неоднорідною поверхнею, який синтезовано за принципом мінімального відхилення від номінальних параметрів закону руху АКА. Спостереження зміни стану визначається за принципом порушення “комфортності” переміщення АКА впродовж циклу руху.

Як відомо, рух АКА є циклічним і складається з декількох фаз.

Перша фаза (початкова) розпочинається з стану спокою (Рисунок 1.10, а), і характеризується двоопорною стійкістю (ДС) АКА. При цьому, проекція центру мас співпадає з поверхнею, яка визначається контуром опор АКА.

При цьому, проекція центру мас співпадає з поверхнею, яка визначається контуром опор АКА. Наступна фаза характеризується одноопорною стійкістю АКА (Рисунок 1.10, b, d) коли проекція центру мас зміщується вздовж напрямку його руху і співпадає з проекцією розвантаженої опори на поверхню переміщення (ПП).

Після цього знову настає фаза двоопорної, але вже динамічної стійкості (Рисунок 1.10, c), що супроводжується переносом центру мас АКА, для якої характерна зміна величини сили реакції в опорах.

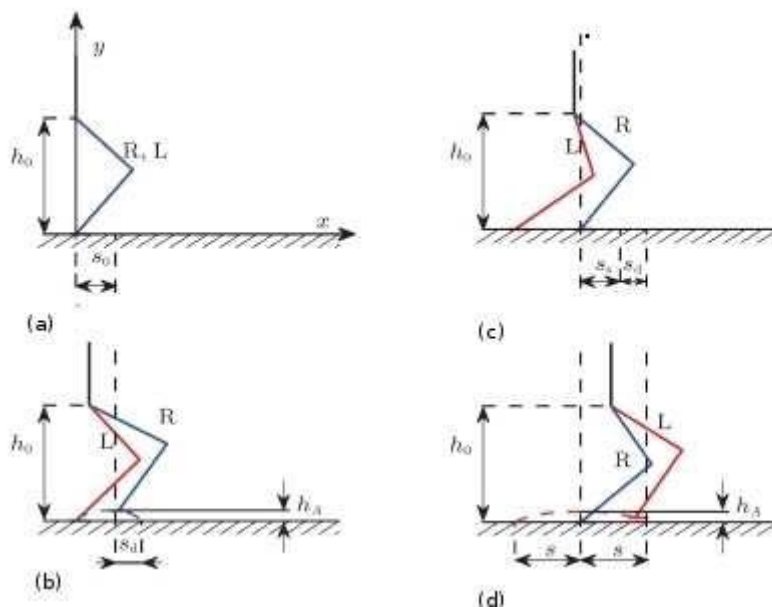


Рисунок 1.10 – Фази руху крокуючого апарата. а. – початкова фаза; b. – фаза першого кроку c. – двоопорна фаза d – одноопорна фаза

Узагальнена модель руху АКА, як твердого багатоланкового тіла, описується системою:

$$M(y)\ddot{y} = h(\dot{y}, y) + B^T \tau \quad (4)$$

де $M(y) \in R^{(n \times k)}$ – матриця просторового положення апарата (n – кількість ступенів свободи; k – кількість ланок у складі АКА); $y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ – вектор стану системи; $h(\dot{y}, y)$ – зовнішні сили, що діють на АКА; B^T – матриця керованих впливів; τ – моменти в шарнірах.

Зауважуючи на те, що під час руху АКА контактує з ПП у певних точках, які накладають на рух його ланок обмеження, кількість яких варіюється від m (для ОС) до $2m$ (для ДС), то в загальному випадку, кількість ступенів свободи АКА буде лежати в діапазоні від $k = n - m$ до $l - n - 2m$.

Виділяється наступні основні групи обмежень, які описують всі можливі безударні фази руху АКА:

I група – реономні обмеження, які діють на АКА у випадку, якщо $l - n - 2m$;

II група – альтернативні, які можуть бути:

- кутові (для випадку ОС), коли параметри лівої опори (L) обмежені реономними параметрами m ;
- голономні (для випадку ДС), коли обмеження діють на розвантажену опору дотичну до ПП;

III група – скеленомні обмеження, які діють на навантажену опору (у випадку ОС) або на розвантажену опору (у випадку ДС).

Означені вище обмеження є основними і можуть бути представлені у вигляді наступного рівняння:

$$\varphi = \min[\varphi_a^T, \varphi_b^T, \varphi_c^T]^T = 0, \quad (5)$$

де – найменша з диференціальних функцій; φ_a , φ_b , φ_c – вектори розмірності l , m , k відповідно. Тоді, рівняння керування рухом АКА буде мати наступний вигляд:

$$M\ddot{y} = h + B^T + C_b^T \lambda_b + C_c^T \lambda_c, \quad (6)$$

$$C_c(\dot{y}, y, t)\ddot{y} + C_{c0}(\dot{Y}, y, t) = 0, \quad (7)$$

де $\lambda_b = [\lambda_{b1}, \lambda_{b2}, \dots, \lambda_{bm}]^T$ – обумовлена реакція на обмеження II групи; B^T – матриця керуючих впливів за моментами; $C_c^T \lambda_c$ – обумовлена реакція на обмеження III групи; λ_c – узагальнені обмеження, накладені на дотичну до поверхні ланку АКА; $[C_b]^T = \left[\frac{d\varphi_b}{dx}\right]^T$ і $[C_c]^T = \left[\frac{d\varphi_c}{dx}\right]^T$ – зміні моментів у шарнірах.

У фазі ДС наявність m дотичних до ПП точок накладає відповідні додаткові обмеження на переміщення АКА. Дані обмеження формуються у результаті дії відповідних m сил реакцій опори. Величина сили реакції розвантаженої опори АКА для випадку ДС становитиме λ_b , а при переході від фази ДС до фази ОС наближатиметься до нуля. Таким чином, опора взаємодіє з ПП без будь яких зіткнень.

Для визначення кутового моменту τ , з n рівнянь (6) отримаємо $n - m$ взаємозамінних рівнянь шляхом перемноження лівих частин рівнянь (6) на ортогональну матрицю доповнень D_c . Таким чином, $D_c C_c^T = 0$, де D_c має розмірність $(n - m) \times n$, а останній член рівняння (6) — скорочується. Тоді, значення кутового моменту визначається умовою:

$$\tau = (D_c B^T)^{-1} D_c (M\ddot{y} - h - C_b^T \lambda_b), \quad (8)$$

а обмеження, накладені реакцією опори, можна описати так:

$$\lambda_c(\dot{y}, y, t) = -(C_c M^{-1} C_c^T)^{-1} [C_{c0} + C_c M^{-1} (h + B^T \tau + C_b^T \lambda_b)] \quad (9)$$

$$C_{c0}(\dot{y}, y, t) = -[\dot{C}_c \dot{y} + d/dt(d\varphi_c/dt)].$$

Модель наведена без врахування маси АКА та його тертя з поверхнею. Крім того, дана модель змінює вектор стану системи, який визначається залежністю $y = [x_H, y_H, \theta_{R1}, \theta_{R2}, \theta_{R3}, \theta_{L1}, \theta_{L2}, \theta_{L3}, \theta_T]^T$, $k = 6$, $m = 3$, $l = 3$, де параметри рівняння вказані згідно рисунка 1.11.

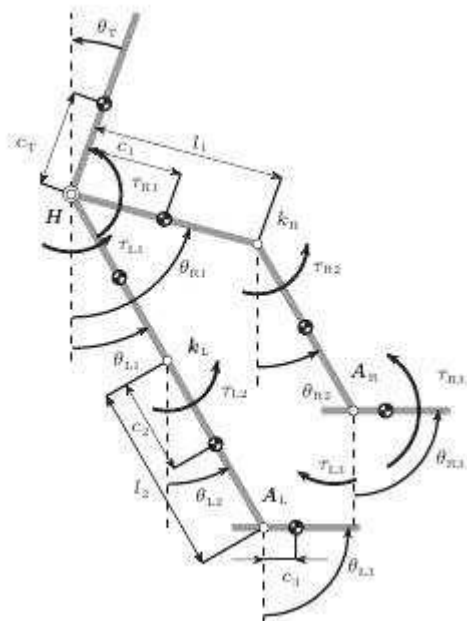


Рисунок 1.11 – Схема зв'язків ланок, моментів у шарнірах та кутів між ланками АКА

Обмеження I групи задають траєкторію руху ланки C_1 (Рисунок 1.12) та положення корпусу АКА. У загальному випадку їх можна описати так:

$$\varphi_a = [x_H - x_H \tan_n(t); y_h = (h_0 - x_H \tan \gamma); \theta_T] = 0 \quad (10)$$

Тоді, обмеження II та III груп можуть бути подані у вигляді:

$$\varphi_{b,c} = \begin{bmatrix} x_H + l_1 \sin \theta_{i1} + l_2 \sin \theta_{i2} - x_{Ai}; \\ y_H - l_1 \cos \theta_{i1} - l_2 \cos \theta_{i2} - y_{Ai}; \theta_{i3} - (\pi/2 + \gamma) \end{bmatrix} = 0$$

де i визначає R або L; x_{Ai} і y_{Ai} – координати ланки C_i (Рисунок 1.11); γ – градієнт нахилу ПП (додатній у випадку підйому та від'ємним для випадку

спуску); θ_i – кут нахилу ланок АКА до вектору гравітації (Рисунок 1.11); l_1 , l_2 – довжини ланок АКА (Рисунок 1.11). При цьому кількість обмежень $n = 3$ і $m = 3$ для кожної ланки і $l = 3$ для корпусу.

Координати ланки C_1 для першого кроку визначаються з рівняння

$x_{Hn}(t) = a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3$ з врахуванням градієнтних обмежень $x_{Hn}(0) = \dot{x}_{Hn}(0) = \ddot{x}_{Hn}(T_0)$, $x_{Hn}(t_0) = s_0$, $\dot{x}_{Hn}(t_0) = v_0$ і $\ddot{x}_{Hn}(T_0) = 0$; T_0 і s_0 – періоди і довжина першого кроку. Для всіх наступних кроків швидкість переміщення ланки C_l (рис. 2) v_0 постійна і подана у вигляді $x_{Hn}(t) = s_0 + v_0(t - T_0)$, де $T_0 = T_{SS} + T_{DS}$, $s_d = v_0 T_{DS}$ і $s_s = v_0 T_{SS}$, T_{DS} і T_{SS} – період ДС і ОС фаз – відповідно. Наступні фази руху АКА описуються аналогічно.

У випадках голономних та скеленомних обмежень x_{Ai} буде константою, відмінною від нуля, а $y_{Ai} = 0$. Для реономних обмежень, положення ланки C_1 по осі X визначається виразом $x_{Ain}(t) = b_5 t^5 + b_4 t^4 + b_3 t^3 + b_2 t^2 + b_1 t + b_0$. Коефіцієнти в даному виразі вибираються таким чином, щоб задовольнити умови:

$$\begin{aligned} x_{Ain}(T_{SS1}) &= 0; \\ z &< 3; \\ x_{Ain}(T_{SS1}) &= (z - 2)s; \\ \dot{x}_{Ain}(T_{SS1}) &= \ddot{x}_{Ain}(T_{SS1}) = 0; \\ a_{Ain}(T_{SS1}) &= zs; \\ \dot{x}_{Ain}(T_{SS3}) &= \ddot{x}_{Ain}(T_{SS3}) = 0; \end{aligned}$$

де z – номер поточного кроку, T_{SS1} – час від початку поточної ОС фази, для якої виконується умова $T_{SS3} = T_{SS1} + T_{SS}$.

Координати ланки C_3 (Рисунок 1.11) по осі X можуть бути отримані з рівняння $x_{Ai} = x_{Ain}(t)$.

Фаза двоопорної динамічної стійкості складається з двох складових.

Перша складова задається рівнянням

$y_{Ain}(t) = c_5 t^5 + c_4 t^4 + c_3 t^3 + c_2 t^2 + c_1 t + c_0$, за умови виконання рівнянь:

$$y_{Ain1}(T_{SS1}) = \dot{y}_{Ain1}(T_{SS1}) + \ddot{y}_{Ain1}(T_{SS1}) = 0, y_{Ain1}(T_{SS2}) = h_A;$$

$$\dot{y}_{Ain1}(T_{SS2}) = \ddot{y}_{Ain1}(T_{SS2}) = 0.$$

де $T_{SS2} = T_{SS1} + 0.5T_{SS}$ – час у середині поточного кроку.

Тоді друга складова визначається рівнянням:

$y_{Ain2}(t) = d_5 t^5 + d_4 t^4 + d_3 t^3 + d_2 t^2 + d_1 t + d_0$, при умові виконання рівнянь:

$$y_{Aom2}(T_{SS2}) = h_A, \dot{y}_{Ain2}(T_{SS2}) = \ddot{y}_{Ain2}(T_{SS2}) = 0;$$

$$T_{Ai}(T_{SS3}) = \dot{y}_{Ain2}(T_{SS3}) = \ddot{y}_{Ain2}(T_{SS3}) = 0.$$

Координати ланки C_3 (Рисунок 1.11) по напрямку Y отримується з рівняння:

$$y_{Ai} = y_{Ain1}(t) + x_{Ain}(t) \tan \gamma, t \in [T_{SS1}, T_{SS2}] \quad (11)$$

$$y_{Ai} = y_{Ain2}(t) + x_{Ain}(t) \tan \gamma, t \in [T_{SS2}, T_{SS3}]$$

Тоді, матриці C_c і D_c для рівнянь (8,9) визначаються з рівняння (12) у вигляді:

$$C_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & l_1 \cos \theta_{R1} & l_2 \cos \theta_{R1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & l_1 \sin \theta_{R2} & l_2 \sin \theta_{R2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$D_c = \begin{bmatrix} -l_1 \cos \theta_{R1} & -l_1 \sin \theta_{R1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -l_2 \cos \theta_{R2} & -l_2 \sin \theta_{R2} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Рівняння (13,14) дійсні при наявності обмежень III групи, що накладені на закон переміщення правої опори АКА (R), тобто для випадку, коли права опора АКА дотикається до поверхні у фазах руху ДС і ОС.

У іншому випадку, коли ліва опора (L) дотикається до поверхні, стовпці

3-5 і 6-8 рівнянь (13,14) взаємно замінюються. Окрім того, очевидно, що у випадку голономних обмежень, накладених на опору L, здійснюється модифікація матриці C_c до виду:

$$C_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_1 \cos \theta L1 & l_2 \cos \theta L2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & l_1 \sin \theta L2 & l_2 \sin \theta L2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

У випадку накладення тих же обмежень на опору R виконуються відповідні зміни у рівнянні 14 до виду рівняння 15.

Обмеження довільної поверхні на переміщення опор L та R задаються у вигляді $\lambda_{bn}(t) = (\lambda_{b0}/2)[1 + \cos(\pi t/T_{DC})]$. Параметри $\lambda_b = [F_{biT}, F_{biN}, M_{bi}]^T$, $i = R, L$ показані на Рисунок 1.12, де F_{biN} і F_{biT}

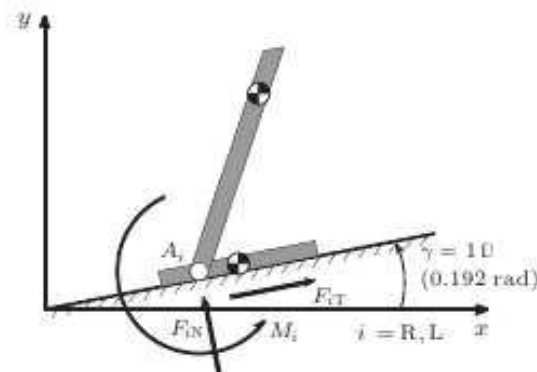


Рисунок 1.12– Параметричні обмеження довільної поверхні на переміщення ланки C_3

Тоді, якщо λ_{b0} містить значення реакції опори на початку фази ДС, то t – задає фактичний час фази руху.

Значення сили реакції опори у випадку обмежень III групи визначатиметься з рівнянь 9 у вигляді: $\lambda_c = [F_{ciT}, F_{ciN}, M_{ci}]^T$, $i = R, L$, де F_{ciN} і F_{ciT} є такими ж реакціями, що і у випадку наведеному раніше у обчисленнях.

Траєкторії ланок C_1 , C_2 , C_3 (Рисунок 1.11), описаних рівнянням (11), задається параметрами вектора стану апарата: $s_0 = s_s = 0.12m$, $s = s_d = 0.2m$, $v_0 = 0.4m/s$, $T_0 = 0.5s$, $h_0 = 0.55m$, $h_A = 0.05m$, згідно з даними в таблиці 1.

Таблиця 1.1 – Параметри конструкції досліджуваного АКА

Параметри	1 ланка (C_1)	2 ланка (C_2)	3 ланка (C_3)
m_j	5 kg	2.25 kg	0.5 kg
J_j	0.1 kg*m2	0.1 kg*m2	0.006 kg*m2
l_j	0.3	0.35m	—
c_j	0.07	0.15m	0.05m
m_T	15	—	—
J_T	1	—	—
c_T	0.2 m	—	—

Координати положення ланок визначаються за допомогою дев'яти нелінійних алгебраїчних рівнянь (5) та метода чисельної ітерації.

Похідні координат положення АКА отримують з диференційної форми рівняння 5. Після визначення диференційної форми визначаються обмеження, що накладені на ланки. Потім визначається значення кутового моменту та сили реакції опори, визначаються шляхом вирішення алгебраїчних рівнянь 8, 9 — відповідно. В результаті отримаємо формалізацію АКА для випадків $a - d$ фаз руху (Рисунок 1.10).

Було проведено експеримент переміщення АКА трьома типами поверхонь по п'ять кроків на кожній. Перша поверхня мала схил на 10° у площині ристання, друга поверхня — без зміни висоти, а третя поверхня з підйомом на 10° . На рисунку 1.13 показано зміщення ланки C_3 (Рисунок 1.11) для випадку трьох типів ПП у сагітальній площині.

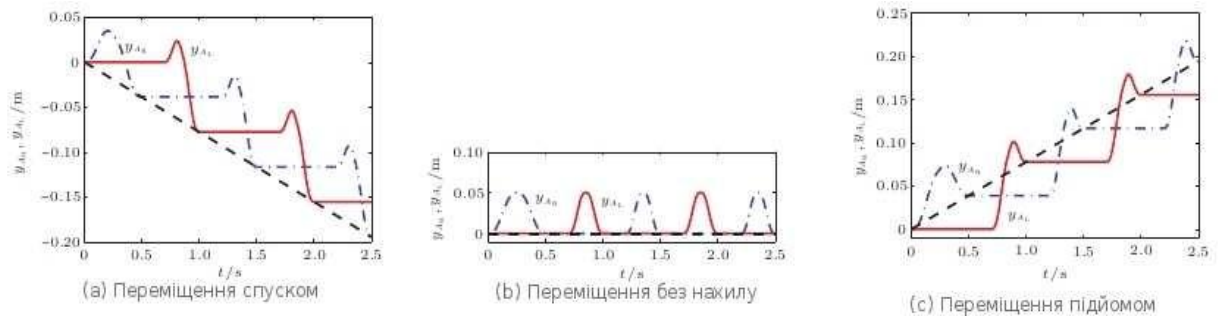


Рисунок 1.13 – Переміщення ланки С3 у випадках руху спуском (а), прямою площиною (b) та підйомом (с)

На рисунку 1.14 зображено керування АКА за моментом і силою реакції опори, з якої видно, що максимальне значення моментів у шарнірах досягається під час підйому похилою площиною, тоді, як рух без нахилу та спуск мають мінімальні значення моментів, що свідчить про їх низьку енергоємність, зокрема для ОС фази руху.

Зважаючи на те, що кінематична енергія еквівалента сумі робіт по її переміщенню та дотриманню рівноваги, робота приводів АКА може бути розрахована так:

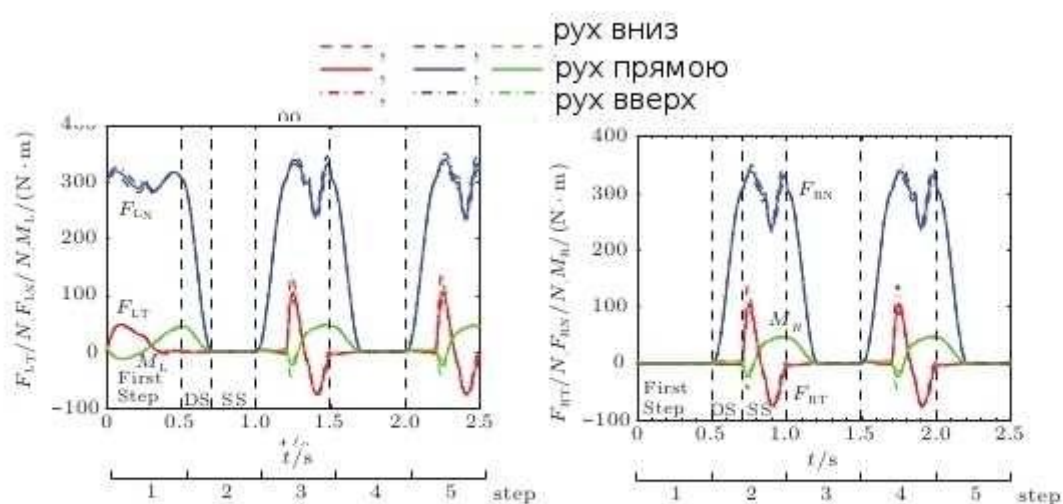


Рисунок 1.14 – Керування лівою та правою опорами за моментом та силою в опорі

$$W(t) = \int |u_m \omega| dt, [t_0, t_1], \quad (15)$$

де $u_m = [\tau_{R1} + \tau_{R2} + \tau_{R3} + \tau_{L1} + \tau_{L2} + \tau_{L3}]$ – вектор відносних кутових швидкостей у шарнірах; $[t_0, t_1]$ – інтервал часу на один крок.

Тоді, загальні енергетичні витрати на один крок АКА визначаються так:
 $W_{total}(t) = R_{R1}(t) + R_{R2}(t) + R_{R3}(t) + R_{L1}(t) + R_{L2}(t) + R_{L3}(t)$.

Параметр $P = |u_m \omega|$ є механічною потужністю, яка не потребує ефективної роботи приводів та здійснюється засобами пасивної динаміки, а енергетичні затрати на активному етапі переміщення АКА незалежні від поверхні, що проілюстровано на рисунку 1.15.



Рисунок 1.15 – Енергетичні затрати на ефективному етапі руху у випадках спуску, переміщення та підйомом – відповідно

Проведені в роботі дослідження показали, що використання пасивної динаміки для забезпечення руху АКА є більш енергоефективними ніж активної динаміки, та при цьому забезпечує дотримання динамічної рівноваги під час руху АКА на довільній поверхні[5].

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДВОНОГОЇ ХОДЬБИ РОБОТА

2.1 Біомеханіка антропоморфної ходьби і її перенесення на робота

Ідеї багатьох технічних рішень були помічені інженерами в природі. В цьому плані люди мають ідеальний спосіб двоногого переміщення, що поєднує в собі активні фази руху з використанням сили м'язів і енергоефективні пасивні фази, коли кінетична енергія попереднього кроку використовується у виконанні поточного кроку. Тому природно спробувати безпосередньо перенести кінематику руху людини на робота, використовуючи, наприклад, системи захоплення рухів. Однак пряме перенесення ходи людини на робота складне завдання через сильні відмінності в будові, обмеження в можливостях приводів і сенсорів робота. Наприклад, у людини задіяні близько 350 пар м'язів в процесі ходьби, що на порядок більше кількості приводів в роботі. Іншою важливою особливістю руху людини є те, що ноги виконують функції амортизатора, проте конструктивні особливості більшості сучасних антропоморфних роботів не дозволяють домогтися ефективної амортизації. Ще однією важливою відмінністю є кількість ступенів свободи. Зокрема, в ході людини існують фази опори на п'яту і на носок стопи. Однак частіше всього роботи мають плоску стопу, що виключає можливість використання такого підходу. Таким чином, синтез двоногої ходьби роботів вимагає деяких спрощень у порівнянні з ходьбою людини.

З точки зору теорії управління ДКР являє собою складну динамічну систему, особливо це стосується ходьби. Виділимо основні проблеми управління рухом двоногого робота:

Збереження рівноваги руху. Під рухом двоногих крокуючих роботів зі збереженням рівноваги ми розуміємо пересування робота без падіння. На відміну від інших типів мобільних роботів, питання збереження рівноваги двоногого робота стає критичним. Фундаментальною відзнакою руху двоногих антропоморфних роботів від інших типів антропоморфних роботів є наявність некерованого ступеня свободи в місці контакту стопи робота з

поверхнею. Цей ступінь свободи не може бути керований безпосередньо і існує необхідність відповідним чином управляти іншими ступенями свободи, щоб уникнути перекидання робота. Таким чином, вплив цього неконтрольованого ступеня свободи має вирішальне значення для рівноваги системи. Спільне використання різних типів датчиків, таких як акселерометри, гіроскопи, силомоментні датчики, дозволяють забезпечити контроль рівноваги системи під час руху і взаємодії з іншими об'єктами.

Вплив удару при зіткненні ноги з поверхнею. Нерівності на поверхні ходьби, а також удар при зіткненні переносимої ноги з поверхнею можуть бути причиною сильних коливань робота, що може привести до його падіння. Тому існує необхідність згладжування таких ударів шляхом введення додаткової податливості або зворотного зв'язку по силі в стопі.

Утримання тулуба в вертикальному положенні. Під впливом сил тяжіння і з огляду на не ідеальність приводів робота, положення тулуба може відрізнятись від необхідного вертикального положення. Тому виникає необхідність в управлінні цим параметром руху.

Фундаментальними властивостями двоногій ходьби, що полегшують завдання генерації траєкторії робота, є повторюваність і наявність фаз. Для двоногого руху періодом повторення є крок. Це має на увазі, що положення і швидкості в приводах на початку і кінці руху повинні бути однаковими, що полегшує завдання знаходження траєкторій руху. Ще однією характеристикою двоногій ходьби є постійна зміна фаз, коли робот підтримується однією ногою (фаза опори на одну ногу) і коли обидві ноги знаходяться в контакті з землею (фаза опори на дві ноги). Таким чином, в процесі ходьби відбувається зміна типу кінематичного ланцюжка педипуляторів між розімкнутим в фазі опори на одну ногу і замкнутим в фазі опори на дві ноги. Кожен з цих двох випадків представляє різну динамічну ситуацію, яка повинна враховуватися при генерації траєкторій руху робота і контролю.

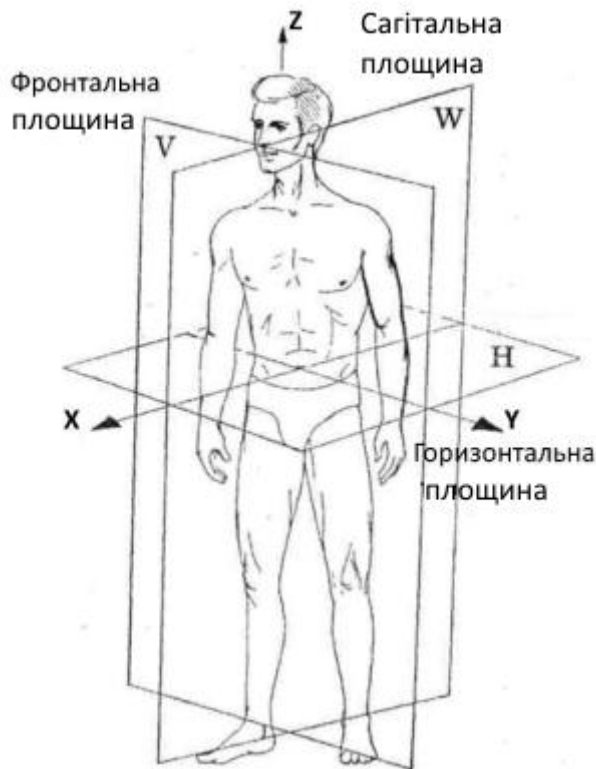


Рисунок 2.1 Фронтальна, сагітальна і горизонтальна площині руху людини

Двонога ходьба стає більш зрозумілою, якщо розглядати її як сукупність рухів в трьох площинах: сагітальній, фронтальній і горизонтальній (рисунок 2.1). Основний рух відбувається в сагітальній площині, так як він збігається з напрямком руху. Рухи у фронтальній і горизонтальній площинах незначні. Однак ці рухи, особливо у фронтальній площині, важливі з точки зору збереження рівноваги ходи.

Розглянемо докладніше рух в сагітальній площині. На рисунку 2.2 представлений цикл кроку. Цикл починається і закінчується, коли права нога торкається землі. На початку циклу йде переміщення ваги на праву ногу в фазі опори на дві ноги. Тривалість цієї фази при нормальній ходьбі людини варіюється в діапазоні 10-15% і зменшується зі збільшенням швидкості ходьби. Після цього ліва нога відривається, переноситься вперед і стає опорною. Знову повторюється фаза опори на дві ноги і фаза опори на одну ногу з виносом правої ноги вперед. Цикл повторюється необхідну кількість разів, здійснюючи рух робота вперед на задану відстань.

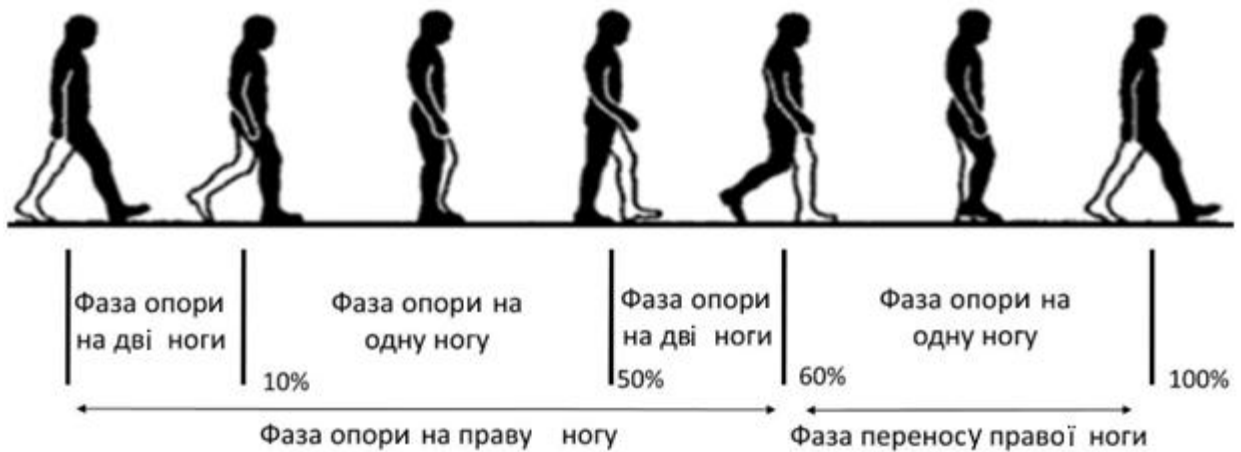


Рисунок 2.2 Фази опори при ходьбі людини

Протягом останніх десятиліть вченими пропонувалися різні методи управління ходьбою ДКР. Методи управління можна умовно поділити на групи. Одна з груп методів, так звана пасивна ходьба, полягає в використанні неконтрольованих, вільних суглобів в ходьбі, які приводяться в рух тільки за рахунок сили тяжіння. ДКР в такому випадку зазвичай йде по похилій площині. *McGeer* показав, що правильно підібрані параметри робота дозволяють домогтися збереження рівноваги при ходьбі вздовж похилій площині. Для усунення невеликих збурень їм було запропоновано використання закруглених стоп. Перевагою пасивної ходьби є мінімальні витрати енергії і висока антропоморфність ходи. Однак через низьку стабільність до зовнішніх збурень і можливості пересуватися тільки по похилій поверхні, цей підхід не отримав широкого поширення. Пізніше дана теорія ходьби була використана при конструюванні в повному обсязі керованих (*underactuated*) механізмів, де контролюється тільки частина суглобів. Результати показують, що така хода менш енергозатратна, однак вимагає більш складних і робастних систем управління.

При активному типі управлінні ходьбою кожен суглоб робота управляється мотором. Ключова відмінність від пасивної ходьби полягає в управлінні рухом переносимої ноги, що дозволяє уникнути сильних ударів в момент контакту і підвищити стабільність руху. Далі ми будемо розглядати тільки

активний спосіб, який лежить в основі даної роботи, так як він забезпечує просте і ефективне рішення задачі управління ДКР.

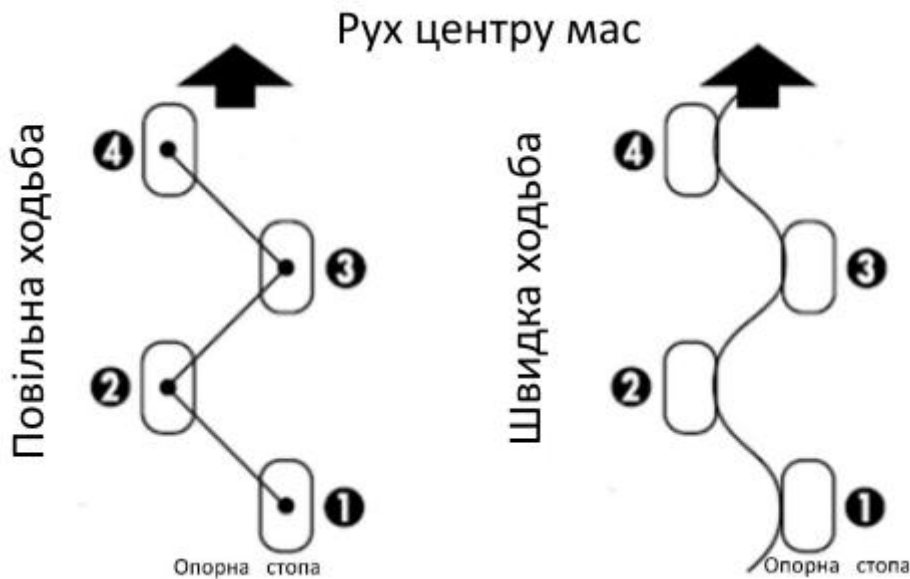


Рисунок 2.3 Приклади статичної та динамічної ходи

Ще однією ключовою відмінністю ходи є її тип: квазістатичний або динамічний. Наочно це відмінність представлено на рисунку 2.3. При квазістатичній ходьбі центр мас робота в момент кроку знаходиться в межах площі опорної стопи. Зупинка ходьби в будь-який момент не приведе робота до падіння. Такий тип ходи притаманний для руху на низьких швидкостях, коли висока амплітуда руху центру мас у фронтальній площині, а вплив динаміки руху робота дуже малий. При динамічному типі ходи навпаки центр мас не зобов'язаний лежати всередині площі опорної стопи для збереження рівноваги, яке досягається за рахунок впливу інерційних сил.

Такий тип ходи дозволяє досягати великих швидкостей і використовується в більшості сучасних роботів.

Резюмуючи перераховані проблеми і властивості руху ДКР, можна виділити наступні етапи розробки системи управління ходьбою:

1. Оцінка можливостей ДКР. Розгляд кінематичної структури, типу приводів, характеристик датчиків.
2. Генерація траєкторії робота забезпечує рух зі збереженням рівноваги з урахуванням кінематичної і динамічної моделі, періодичності та

двофазності руху. Під кінематичної моделлю розуміється розгляд завдань прямої і зворотної кінематики для конкретної моделі робота. Динамічна модель має на увазі розробку наближеної моделі робота, за допомогою якої знаходиться опорна стійка траєкторія, оцінюються параметри ходи.

3. Синтез систем керування зі зворотним зв'язком від інерційних і силомоментних датчиків робота.

Виділимо властивості антропоморфної платформи, що впливають на вибір способів управління роботом:

1. Управління приводами робота здійснюється тільки по позиції за допомогою РІ регулятора. Це означає, що для точного проходження по траєкторії необхідно працювати в «жорсткому» режимі з високими коефіцієнтами P , що впливає на поведінку робота при взаємодії з твердою поверхнею. Іншими словами, на роботі немає можливості безпосередньо регулювати момент в приводах, що дозволило б використовувати адаптивні алгоритми з більш «м'яким» контактом.
2. Кінематичні особливості, такі як плоска стопа, відсутність незалежних ступенів свободи управління нахилом тулуба, обмеженість кутів повороту в суглобі.

Слід згадати роль руху рук в процесі переміщення ДШР. Існує приклади робіт, де авторами використовувалося рух маніпуляторів в процесі ходьби. Однак, це ускладнює систему управління роботом, при цьому не даючи істотне поліпшення з точки зору збереження рівноваги і збільшення швидкості ходи. Тому в роботі акцент зроблено на роботу з педипуляторами робота, а верхня частина робота вважається однією ланкою. Непрямим підтвердженням такого вибору є аналіз біомеханіки ходьби людини, де відсутність руху рук під час ходьби практично не позначається на ході, що, наприклад, не можна сказати про біг.

2.2 Завдання прямої і зворотної кінематики робота

Кінематика в робототехніці описує рух робота без урахування сил і моментів, що діють на нього і викликають його рух. Кінематична структура робота AR601-M приведена на малюнку 2.4. Як зазначалося вище, основний інтерес для ходьби робота представляють педіпулятори, тому рішення задач кінематики наводиться для них. Але варто зазначити, що застосовуваний підхід універсальний, і може бути застосований до будь-яких ланцюжках з ланок робота.

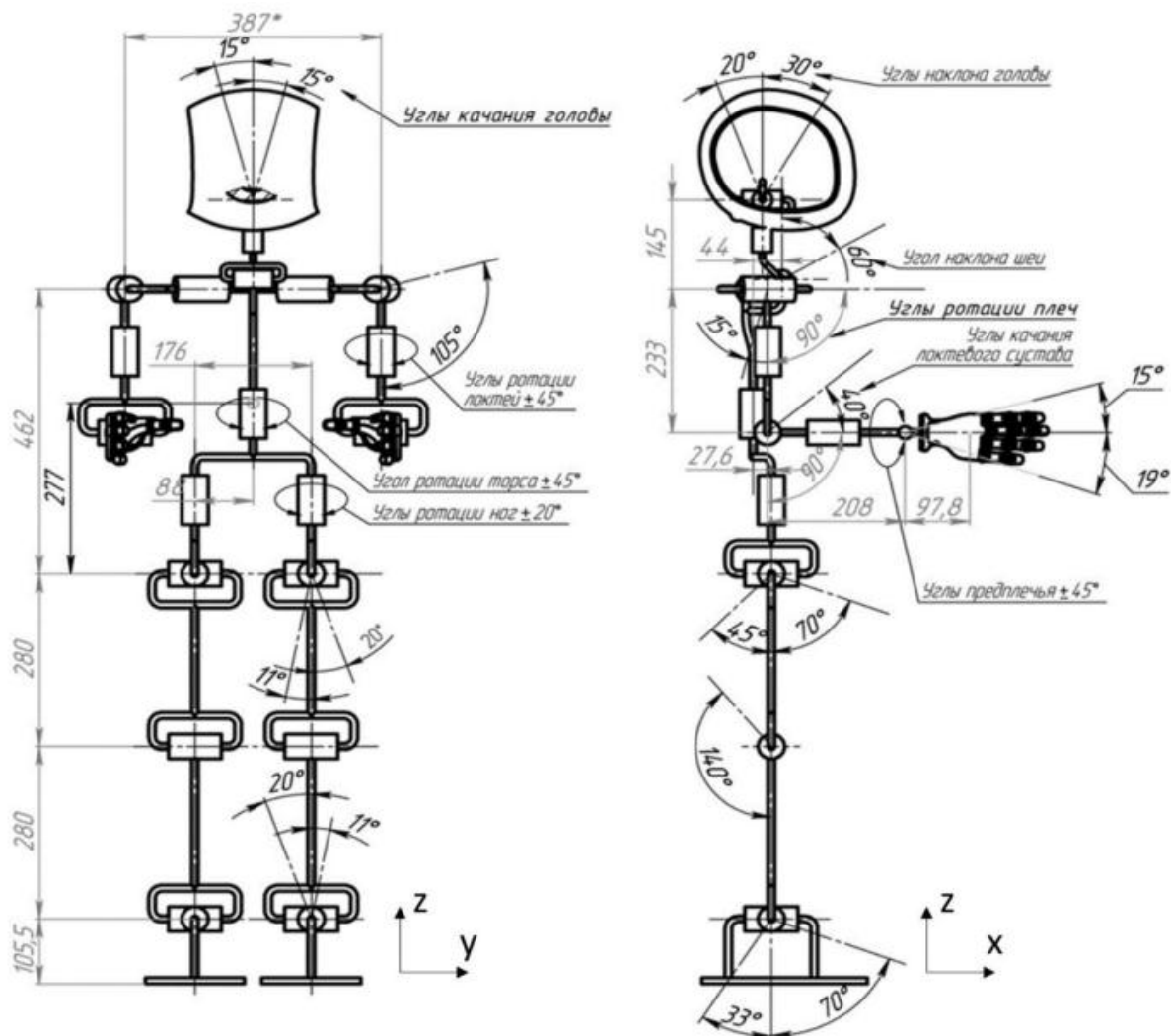


Рисунок 2.4. Кінематична структура робота AR-601M (згідно з технічною документацією виробника)

Завдання прямої кінематики

Завдання прямої кінематики в системі управління рухом робота формулюється так: знаючи позицію і орієнтацію системи відліку, пов'язаної зі стопою робота в глобальній системі відліку, довжини ланок і кути в суглобах ноги, визначити місце розташування і орієнтацію системи відліку, пов'язаної з тулубом робота. На малюнку 2.5 представлена схема ноги робота, її параметри і системи координат. Педипулятор має шість суглобів: три в стегні, що утворюють сферичне з'єднання, один в коліні і два в стопі. Шість ступенів свободи, що задаються кутами q_i , дозволяють повністю контролювати позицію і орієнтацію стопи відносно тулуба.

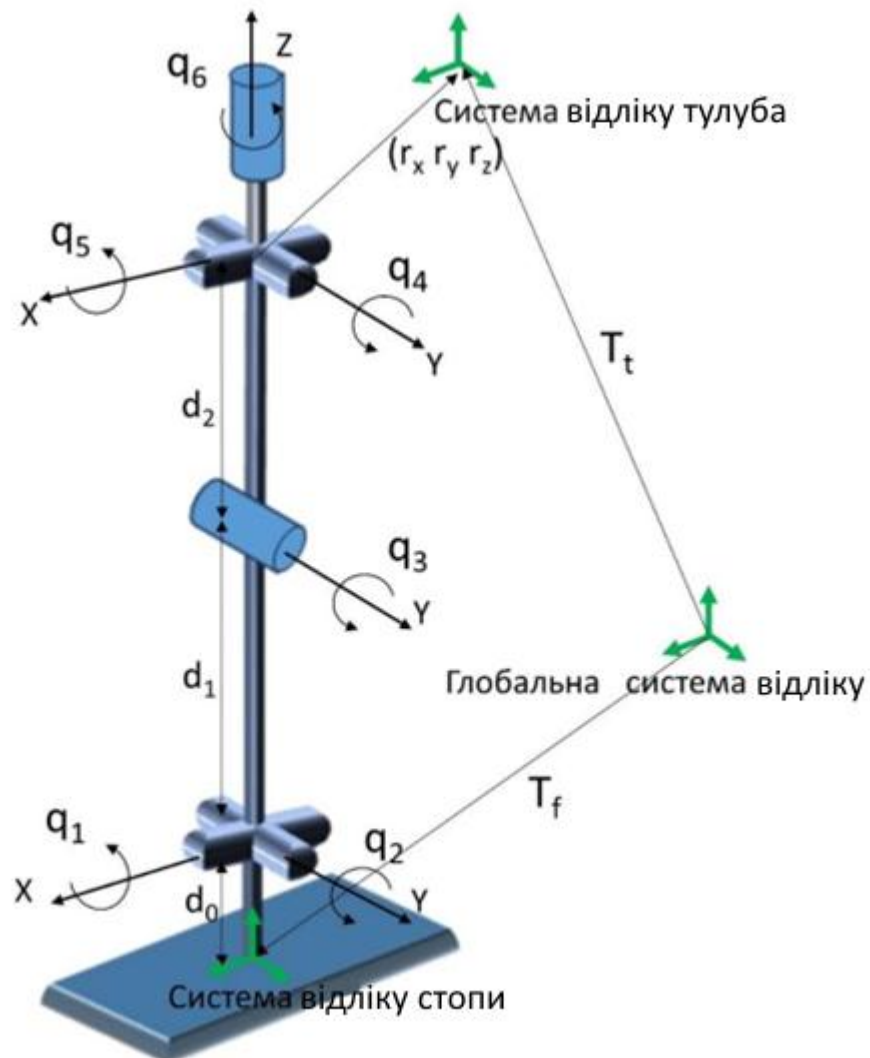


Рисунок 2.5 Кінематична схема педипулятора робота

При описі кінематики робота використовувалася матриця трансформації T , що описує перехід між системами координат. Нехай перехід з глобальної системи відліку в систему відліку стопи задається матрицею трансформації T_f , останній рядок якої визначається позицією стопи, а ліва верхня квадратна підматриця розмірності три є матрицею обертання з глобальної системи відліку в локальну. Тоді завдання прямої кінематики зводиться до розрахунку матриці трансформації в систему відліку тулуба T_t . Використовуючи властивості матриць трансформації, отримуємо:

$$T_t = T_f T_{d_0} T_{q_1} T_{q_2} T_{d_1} T_{q_3} T_{d_2} T_{q_4} T_{q_5} T_{q_6} T_r \quad (2.1)$$

де матриці елементарних перетворень знаходяться як:

$$\begin{aligned} T_{d_0} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{d_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ T_{d_2} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & r_x \\ 0 & 1 & 0 & r_y \\ 0 & 0 & 1 & r_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

Тут q_{1-6} - кути в суглобах ноги, d_0 - відстань між поверхнею стопи і суглобом стопи, d_1, d_2 - відповідно довжини гомілки і стегна, r_x, r_y, r_z - відповідні компоненти вектора між суглобом стегна і системою відліку тулуба, як показано на рисунку 2.5. Матриці обертань в суглобах знаходяться як:

$$\begin{aligned} T_{q_1} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 \\ 0 & \sin q_1 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{q_2} = \begin{bmatrix} \cos q_2 & 0 & \sin q_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin q_2 & 0 & \cos q_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ T_{q_3} &= \begin{bmatrix} \cos q_3 & 0 & \sin q_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin q_3 & 0 & \cos q_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{q_4} = \begin{bmatrix} \cos q_4 & 0 & \sin q_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin q_4 & 0 & \cos q_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ T_{q_5} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q_5 & -\sin q_5 & 0 \\ 0 & \sin q_5 & \cos q_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{q_6} = \begin{bmatrix} \cos q_6 & -\sin q_6 & 0 & 0 \\ \sin q_6 & \cos q_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

Отримавши матрицю T_t , положення системи відліку тулуба знаходиться з останнього стовпця (поступальна частина матриці трансформації), а орієнтація тулуба знаходиться з матриці обертання (обертальна частина матриці трансформації), що є лівій верхній підматрицею матриці T_t .

Завдання зворотної кінематики

Завдання зворотної кінематики в системі управління рухом робота формулюється так: знаючи позицію і орієнтацію системи відліку, пов'язану зі стопою робота в глобальній системі відліку, і позицію і орієнтацію системи відліку, пов'язану з тулубом робота, знайти кути в суглобах педипулятора. Особливість кінематики ноги робота полягає в тому, що ногу знизу-вгору можна розглядати як класичний шести статечної маніпулятор зі сферичним суглобом на кінці (стегно). А для таких маніпуляторів Пайпером запропоновано точний аналітичний розв'язок задачі зворотної кінематики. Суть методу полягає в поділі завдання і знаходженні на першому етапі кутів перших трьох суглобів по позиції сферичного суглоба, а на другому етапі, використовуючи знайдені кути, знаходяться кути інших трьох суглобів.

Представимо (2.1) у вигляді:

$$T_{16} = T_{d_0}^{-1} T_f^{-1} T_t T_r^{-1} = T_{q_1} T_{q_2} T_{d_1} T_{q_3} T_{d_2} T_{q_4} T_{q_5} T_{q_6} \quad (2.4)$$

де матриця T_{16} є матрицею переходу від системи координат першої ланки (стопи) до системи координат останньої ланки (тулуба). Зауважимо, що обертання суглобів 4, 5, 6 не впливає на частину матриці T_{16} , що відповідає за зсув. Нехай зміщення в матриці T_{16} задається вектором $[x_{16} \ y_{16} \ z_{16}]^T$, який вираховується шляхом перемноження матриць $T_{d_0}^{-1} T_f^{-1} T_t T_r^{-1}$. З іншого боку, лінійне переміщення, визначається перемноженням матриць $T_{q_1} T_{q_2} T_{d_1} T_{q_3} T_{d_2}$, дорівнює:

$$T_{q_1} T_{q_2} T_{d_1} T_{q_3} T_{d_2} [1:3,4] =$$

$$= \begin{bmatrix} d_1 \sin q_2 + d_2 \cos q_3 \sin q_2 + d_2 \cos q_2 \sin q_2 \\ -\sin q_1 (d_1 \cos q_2 + d_2 \cos q_3 \cos q_2 - d_2 \sin q_3 \sin q_2) \\ \cos q_1 (d_1 \cos q_2 + d_2 \cos q_3 \cos q_2 - d_2 \sin q_3 \sin q_2) \end{bmatrix}$$

Звідси з рядків 2 і 3 отримуємо кут $q_1 = \text{atan2}(-y_{16}, z_{16})$. Кути q_2 і q_3 знайдемо, помітивши, що вони утворюють плоский маніпулятор з (2.5)

двома ступенями свободи, рішення оберненої задачі кінематики якого знаходиться геометричним шляхом. Варто відзначити, що всього ми отримуємо вісім конфігурацій кутів (два варіанти для кута q_2 і чотири для q_3). Однак, підставивши рішення і геометрично оцінивши отримані конфігурації ноги робота, можна вибрати єдино вірний набір кутів.

Отже, знаючи позицію і орієнтацію стопи і тулуба в глобальній системі координат, ми знайшли кути в шести суглобах ноги. Слід зазначити, що при знаходженні кутів розглядався кінематичний ланцюжок від стопи до тулуба, так як саме в такій послідовності суглобів останні три суглоба мають перетин осей обертання в одній точці, що потрібно для можливості застосування аналітичного рішення задачі зворотної кінематики.

Однак при роботі з роботом послідовність суглобів задається зверху вниз. Тому знайдені в завданні зворотної кінематики кути беруться зі зворотним знаком.

2.3 Критерій збереження рівноваги при двоногій ходьбі

Критерій динамічної стабільності руху ДКР завжди був важливою частиною теоретичних робіт вчених в цьому напрямку. Найпопулярніший і найбільш широко поширений критерій, точка нульового моменту (ТНМ), був запропонований Вукабратовічем і його колегами в 1970 році [16]. Хоча критерій ТНМ і довів свою спроможність при роботі з різними роботами, вченими були запропоновані ряд інших критеріїв. Госвами в 1990 запропонував використовувати індикатор повороту стопи (Foot Rotation Indicator), який розширює поняття ТНМ в тому сенсі, що для ходи при високих швидкостях не обов'язково знаходження ТНМ строго в межах площі

опори. У 2006 році Хірукава і його колеги з японського Національного Інституту Передовий Промислової Науки і Технології запропонували більш робастний критерій збереження рівноваги, конус контактних моментів (Contact Wrench Cone), який добре застосуємо для ходи по нерівній поверхні. Ідея критерію полягає в тому, що якщо сума гравітаційних і інерційних моментів сил, прикладених до центру мас робота, знаходиться всередині поліедрального опуклого конуса, утвореного моментами сил контакту між стопами робота і навколишнім середовищем, то рівновага руху зберігається. Незважаючи на те, що за допомогою двох останніх критеріїв були досягнуті цікаві результати в моделюванні руху ДКР, реальний ефект вони дають при великих швидкостях руху, коли інерційні складові вносять вагомий вклад в положення рівноваги. Тому, наша робота базується на критерії ТНМ, який може бути в подальшому модифікований до конуса контактних моментів. Розглянемо критерій ТНМ докладніше.

В незалежності від структури і кількості ступенів свободи, однією з основних властивостей ДКР є можливість обертання системи навколо краю стопи, тобто перекидання під впливом сильних збурень, що еквівалентно наявності в місці контакту стопи з поверхнею некерованою пасивної ступеня свободи. Положення і орієнтація стопи щодо підстильної поверхні руху не можуть контролюватися безпосередньо, а лише опосередковано, шляхом забезпечення потрібної динаміки системи, що знаходиться вище стопи. Для досягнення рівноваги ходи необхідно, щоб було повне зіткнення стоп робота з поверхнею.

На рисунку 2.6 (а) показана фаза руху з опорою на одну стопу, коли стопа повністю стикається з поверхнею. Відзначимо, що ми розглядаємо загальний тривимірний випадок, тому далі вектора сил, моментів і координат відповідають векторам в тривимірному просторі.

Горизонтальні компоненти R відповідають за силу тертя і, при спочиває стопі, врівноважуються горизонтальними компонентами F_A , також як вертикальна складова моменту M_Z врівноважується вертикальної складової

M_A (рисунок 2.6 (с)). Тому, якщо припустити відсутність прослизання між стопою і поверхнею, то цими компонентами сили можна знехтувати.

Вертикальна компонента сили R_Z представляє сили реакції опори, що діють строго вертикально. Це означає, що в стані спокою стопи можна так вибрати точку прикладання сили реакції опори P , що горизонтальні моменти M_A будуть врівноважуватися. Для простоти розуміння на малюнку 2.6 (d) представлений плоский випадок, на якому горизонтальний момент M_{AX} врівноважується шляхом зсуву точки прикладання сили R_Z . Тому, якщо можна вибрати таку точку P , в якій вертикальна сила R_Z компенсує горизонтальні моменти M_A , то горизонтальні моменти M_x , M_y в цій точці дорівнюють нулю і залишається тільки вертикальна компонента M_z , як показано на малюнку 2.6 (b).

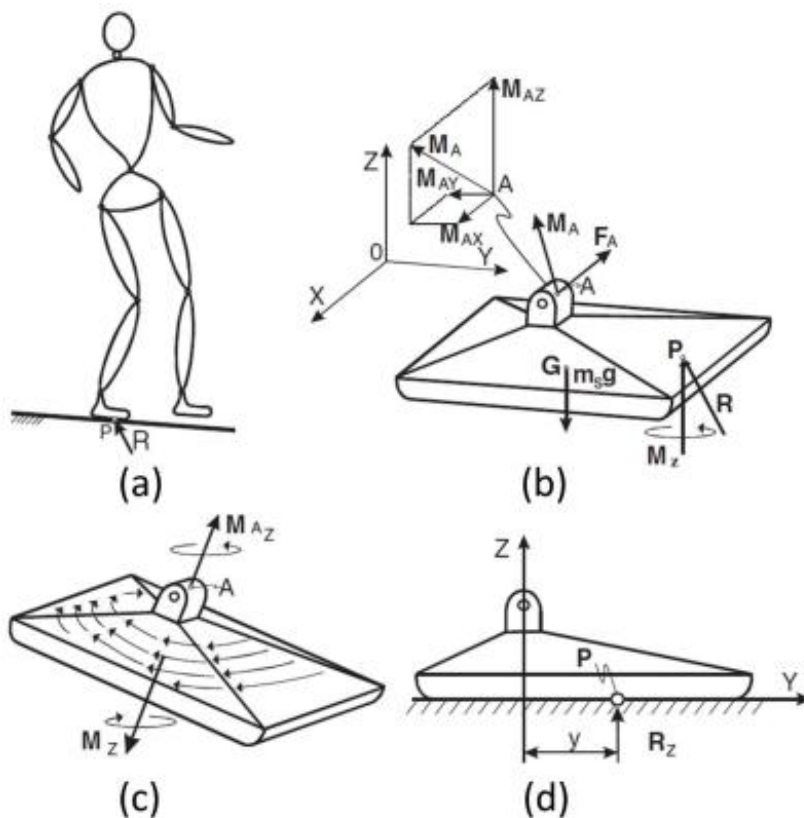


Рисунок 2.6 Сили, що діють на стопу двоногого робота

Якщо ТНМ при русі робота залишається в межах опуклої оболонки точок контакту робота з поверхнею, то рівновага робота при такому русі зберігається.

Швидкості зміни імпульсу і моменту імпульсу розраховуються з траєкторій руху ланок. У разі руху в фазі опори на одну ногу на вільному кінці ланцюжка ланок, а в нашому випадку на вільному кінці яку переносять ноги, діючі сили і моменти сил дорівнюють нулю. Отже, можна знайти сили і моменти сил в суглобі між останнім і передостаннім ланкою. Повторюючи цю операцію для кожної ланки, ми знайдемо всі необхідні сили і моменти сил у всіх суглобах робота. У разі руху в фазі опори на обидві ноги на кінці переносимої ноги виникає сила реакції і рівняння динаміки в методі Ньютона-Ейлера перестають бути однозначно розв'язними.

Для розробки нинішніх кінематичних схем апаратів із механічними кінцівками для пересування застосовуються досить схожі підходи і методи. Але кінематика крокуючого апарату антропоморфного типу містить ряд обмежень його рухомості, які стосуються розміщення шарнірів з обмеженим діапазоном кутів. З точки зору конструювання такі обмеження не завжди можна назвати оптимальним рішенням динамічної поведінки чи енерговитрат, однак з точки зору еволюції вони виявилися необхідними людям[15]. АКА складається з двох три-ланкових опор. Ці опори з'єднані з корпусом і утворюють кінематичний ланцюг. Сусідні ланки утворюють кінематичні пари при використанні шарнірів. Шарніри можуть мати один, два та три ступені свободи. Ланки кінематичної моделі є жорсткими і твердотілими, оскільки у кінематичних парах ланок АКА утворюються незначні кутові моменти. У найпростіших шарнірах, що об'єднують ланки в кінематичні ланцюги, не враховується сила тертя. Кінематична модель АКА містить шість шарнірів, при цьому два з них мають три ступені свободи, є сферичними і аналогічні тазостегновим суглобам людини, ще два шарніри мають одну ступінь свободи, циліндричну форму і аналогічні колінним суглобам людини, ще два – двохосові, циліндричні, які аналогічні до гомілковостопних суглобів людини. Загалом кінематичній схемі апарата притаманні 6 ступенів свободи і 12 ступенів рухомості, за рахунок обертання

по відношенню до базової системи координат і свого власного переміщення. Коли у тазостегнових шарнірах виникає кутовий рух, то ланка корпусу апарата також переміщується. Як зображено на кінематичній схемі моделі, такий рух може спричинити зміну значень кутів в інших шарнірах (одноосьових та двохосьових) ланцюга ланок АКА [14]. Нижче вказано додаткові вимоги, що мають виконуватися у даній кінематичній схемі:

1. Кінематична схема АКА має відрізнятись за поданням залежно від його опорної фази (наприклад, за взаємодією з поверхнею);
2. Розімкнений чи замкнений ланцюг формується у комп'ютерній моделі залежно від опорної фази;
3. У випадку, коли апарат знаходиться в одноопорній фазі, то його структура 60 налічує два розімкнені ланцюги.

Першим ланцюгом є корпус, а другим – вільна опора, яка не контактує з ОП. Після складання кінематичної структури апарата і формування усіх вимог і характеристик, потрібно побудувати кінематичну модель апарата. Така модель АКА повинна давати можливість аналізувати його усталений рух, і як частковий випадок – вирішувати задачу дотримання стійкості АКА на будь-якій поверхні [14].

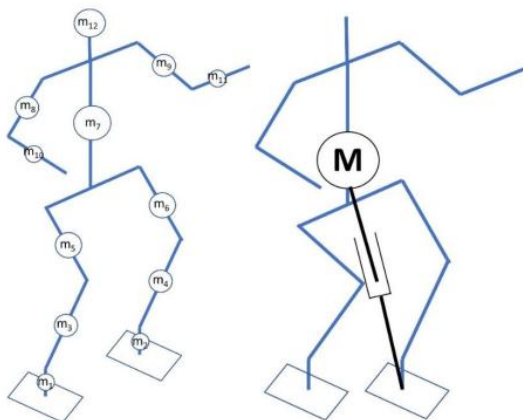


Рисунок 2.7 – Моделі багатомасового зворотного маятника (зліва) і зворотного маятника (праворуч)

У моделі зворотного маятника IPM (Inverted Pendulum Model) робот моделюється точковою масою, розташованою в центрі мас робота (рисунок 2.7) [17]. Іншими словами, в такій моделі робот вдає із себе перевернутий маятник, що рухається в гравітаційному полі. У такому випадку рівняння для координат ТНМ істотно спрощуються. Перевагою даного методу є його простота, проте він добре застосовується для роботів з незначною масою педіпуляторів. У випадку з електромеханічними приводами, які найчастіше зустрічаються в ДКР, зневага динамікою ніг дає суттєві помилки в моделі. Тому виникає питання коригування моделі або ж використання алгоритмів зі зворотним зв'язком від помилки координат ТНМ. Більш точні в порівнянні з IPM моделі, такі як двох-масовий зворотний маятник або зворотний маятник з гравітаційної компенсацією, не дають істотного поліпшення в зменшенні помилок моделі.

2.4 Динаміка педіпуляторів

Для оцінки енергоефективності ходи робота, а також максимально можливої швидкості руху потрібно провести розрахунок моментів сил в суглобах ніг робота, необхідних для руху по заданій траєкторії. Завдання розрахунку моментів сил в суглобах маніпулятора при заданій траєкторії руху називається зворотною завданням динаміки. Ще раз відзначимо, що в даній роботі не розглядається рух маніпуляторів при русі робота і вся верхня частина робота моделюється однією ланкою.

На ричунку 2.8 представлена модель педіпуляторів робота в задачі зворотної динаміки, що складається з п'яти ланок масою m_i і довжиною L_i в сагітальній площині і трьох ланок у фронтальній площині. Вплив руху стопи переносимої ноги на динаміку робота вважається дуже незначним, зважаючи на її невеликої маси в порівнянні з іншими ланками. Момент інерції ланки навколо осі i , перпендикулярній площині руху i проходить через центр мас ланки, дорівнює I_i . Відстань між суглобом і центром мас ланки дорівнює d_i , як показано на рисунку. Положення ланки задається кутом повороту φ_i від

поточного ланки до наступного, починаючи з опорного. Позитивний напрямок зміни кутів показано на рисунку 2.8.

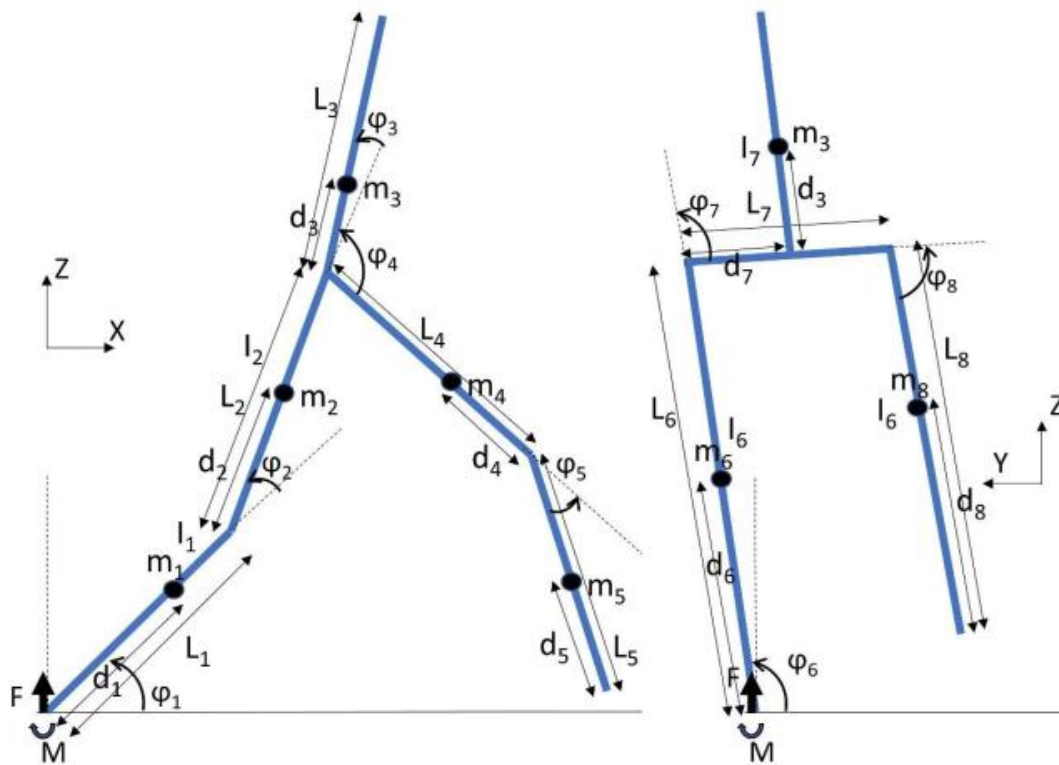


Рисунок 2.8 п'ятиланкова і трьохланкова моделі робота в сагітальній (зліва) і фронтальною (праворуч) площинах

Зворотня задача динаміки для моделі робота вирішувалася рекурсивним методом Ньютона-Ейлера [18]. Перевага методу Ньютона-Ейлера полягає в тому, що він дає не тільки моменти сил, як у випадку, наприклад, методу Ейлера - Лагранжа, а й лінійні сили, що виникають в суглобах. Це в першу чергу потрібно для оцінки координати ТНМ, яка для даної моделі робота буде розраховуватися як відношення моменту M до вертикальної складової сили F , що виникає в опорній стопі (див. рисунок 2.8). Метод Ньютона-Ейлера заснований на наступних твердженнях класичної механіки твердого тіла:

- (а) сили і моменти сил в суглобі, що діють на ланки, рівні по модулю і протилежні за знаком;
- (б) швидкість зміни імпульсу ланки дорівнює сумарній силі, що діє на ланка;

(в) швидкість зміни моменту імпульсу дорівнює сумарному моменту сил, діючих на ланку.

Швидкості зміни імпульсу і моменту імпульсу розраховуються з траєкторій руху ланок. У разі руху в фазі опори на одну ногу на вільному кінці ланцюжка ланок, а в нашому випадку на вільному кінці яку переносять ноги, діючі сили і моменти сил дорівнюють нулю. Отже, можна знайти сили і моменти сил в суглобі між останньою і передостанньою ланкою. Повторюючи цю операцію для кожної ланки, ми знайдемо всі необхідні сили і моменти сил у всіх суглобах робота. У разі руху в фазі опори на обидві ноги на кінці переносимої ноги виникає сила реакції і рівняння динаміки в методі Ньютона-Ейлера перестають бути однозначно розв'язні.

РОЗДІЛ 3. АПАРАТНА ЧАСТИНА УПРАВЛІННЯ ХОДЬБОЮ ДВОНОГОГО РОБОТА

3.1 Програмні засоби управління

Управління рухом таких складних механічних систем, як антропоморфний робот, вимагає створення надійного і ефективного програмного забезпечення як для роботи в віртуальному середовищі, так і в роботі з реальним роботом.

Перелічимо основні вимоги до розроблюваної в даній роботі системи:

Ефективність: симуляція і управління реальним роботом вимагають використання ефективних алгоритмів. Для симуляції це означає мінімізація сумарного часу виконання програми. У разі роботи з роботом, управління в режимі реального часу вимагає мінімізації максимального часу виконання циклу управління.

Переносимість: програмне забезпечення має бути доступним для застосування як для симуляції, так і для роботи з реальним роботом.

Гнучкість: з метою ефективного проведення експериментів в рамках дослідження руху ДШР зміна моделей управління повинно бути максимально простим.

Безпека: робот - дорогий пристрій. Помилки в системі управління можуть серйозно пошкодити робота або поранити оператора. Таким чином, безпека - це важлива умова системи управління.

Використання в якості фреймворка програмного забезпечення операційної системи ROS (Robot Operating System) дозволяє одночасно домогтися ефективності, переносимості та гнучкості системи, що розробляється, а також полегшує завдання забезпечення безпеки. Ефективність досягається шляхом використання як мови програмування C++ для розробки модулів, що вимагають високої продуктивності, так і мови програмування Python для розробки модулів, чиє швидкодія не є критичним для системи, і де більш важливим фактором стає час написання коду. Переносимість є одним з ключових переваг ROS, так як інтегрування з симулятором динаміки Gazebo дозволяє застосовувати розроблені алгоритми в роботі з віртуальним

роботом. гнучкість системи управління при роботі з ROS досягається за рахунок використання стандартних

типів даних і функціоналу для робототехнічних платформ, а також за рахунок модульності розроблюваного програмного забезпечення. Модульність системи управління також допомагає домогтися кращої безпеки за рахунок спрощення задачі проектування систем тестів.

ROS (Robot Operating System) - це мета-операційна система з програмною платформою (фреймворк) і відкритим вихідним кодом для управління і програмування роботів. Вона надає послуги, які зазвичай пропонуються операційними системами, такі як абстракція від обладнання, низькорівневе управління пристроями, реалізацію часто використовуваних функцій, передачу повідомлень між різними процесами, а також систему управління пакетами. Крім того, ROS представляє доступ до різних інструментів і бібліотекам для отримання, компіляції, написання і запуску програм на кількох пристроях.

Роботу ROS архітектурно ми можемо формалізувати як граф, вершинами якого є процеси (в термінології ROS іменовані вузлами), а ребрами графа - канали передачі повідомлень. ROS має кілька типів

зв'язку: через сервіси, асинхронну передачу інформації через так звані топіки (topic), зберігання інформації на сервері параметрів. Розглянемо основні концепції ROS, що використовуються в даній роботі.

Вузол. Це процес, який виробляє обчислення. ROS спроектований так, щоб бути модульним на найнижчому рівні. Таким чином, система контролю робота зазвичай складається з безлічі вузлів, які обмінюються між

собою інформацією за допомогою топіків, повідомлень і сервісів, формують таким чином граф. Наприклад, один вузол здійснює зчитування даних з сенсорів, інший - контролює приводи, третій - здійснює локалізацію, четвертий - планує шлях, п'ятий - надає візуалізацію стану системи і т.д.

Топік і повідомлення. Вузли спілкуються один з одним за допомогою передачі повідомлень з окремих папок. Повідомлення - це структура даних,

що представляє собою набір полів. Наприклад, повідомленням може бути показання гіроскопа або кутів суглобів робота. Повідомлення передаються через транспортну систему, використовуючи семантику публікації / підписки. Вузол посилає повідомлення, публікуючи його в певний топик. Ім'я топика використовується для ідентифікації змісту повідомлення. Вузол, зацікавлений в певному типі інформації, підпишеться на відповідний топик. Можливо безліч одночасних публікаторів і підписник на єдиний топик, як і підписка і публікація єдиним вузлом в множинні топики. У загальному випадку публікатор і передплатник не інформовані про взаємне існування. Основна ідея полягає в роз'єднанні процесів створення та споживання інформації. Можливо також уявлення топика як строго типизованої шини. Кожній шині присвоєно ім'я, і будь-хто може приєднатися до неї для прийому/відправки повідомлень в правильному форматі.

Майстер. Майстер ROS надає реєстрацію імені та доступ до пошуку по обчислювальному графу. Без майстра вузли не могли б знаходити один одного, обмінюватися повідомленнями, викликати сервіси. Частиною майстра є сервер параметрів, що дозволяє зберігати дані по ключу в центральному місці.

Сервіс. Парадигма комунікації «публікація-підписка» дуже гнучка, але такий тип є односпрямованим і типом зв'язку «багато-до-багатьох», що не підходить для взаємодії типу «запит-відповідь», які поширені в розподілених системах. Тип «запит-відповідь» реалізований через сервіс, який визначений як пара повідомлень: один - для запиту, другий - для відповіді.

Клієнт використовує сервіс, посилаючи повідомлення запиту на вузол з певним ім'ям, і переходить в режим очікування відповіді.

Програмне забезпечення в файлової системі ROS організовано у вигляді пакетів. Пакет може включати в себе запускаяться процеси ROS (вузли), бібліотеки, залежні від ROS, набори даних, надбудовні файли та іншу

необхідну інформацію. Пакети є атомарний об'єкт при складанні системи в ROS.

Основним завданням при створенні віртуального робота в середовищі моделювання Gazebo є створення файлу опису робота URDF (Universal Robot Description File) і STL (stereolithography) файлів, що представляють собою точний опис тривимірних моделей частин робота і їх взаємодії. Для вирішення цього завдання використовувався інструмент «SolidWorks to URDF Exporter», який на основі твердотільної моделі робота в середовищі проектування SolidWorks створює необхідні файли опису робота.

Умови порушення усталеного руху АКА на довільній ОП у його статичних положеннях

Внаслідок дії наступних факторів виникає втрата апаратом рівноваги на довільній поверхні:

1. ОП має нерівності у місці контакту самої поверхні зі стопами АКА;
2. ОП має нерівномірно розподілену пружність у місці контакту самої поверхні зі стопами АКА;
3. Стопа АКА проковзує уздовж ОП;
4. Зміна кутових параметрів кінематичних пар АКА є некерованою;
5. Умови стійкості не виконуються через невідповідні передумови просторового розміщення АКА;

Далі проведено аналіз характеру поверхні і пружності ОП із використанням даних про силу реакції опори. Якщо здійснювати постійне спостереження і корекцію розміщення кінематичних пар АКА, то можливо не допустити негативні наслідки від факторів 1 і 2. В даному випадку буде задано нове оптимальне положення ТЦМ замкненої системи крокуючого апарата, не враховуючи зовнішні фактори. Вперше критерієм для обчислення положення проекції ТЦМ апарата на ОП є спостереження та дослідження розподілу сили реакції опори, оскільки такі параметри, як розміщення ТЦМ, координати проекції ТЦМ, напрямок дії гравітації і розподіл сили реакції опори на дотичні стопи апарата, взаємопов'язані.

Перевірка наявності та розміщення на ОП екстремумів нерівностей, а також класифікація пружності дотичної до ланок апарата поверхні (стосується факторів 1 і 2 відповідно) здійснюється за допомогою дослідження даних про розподіл сили реакції опори.

Далі проведено аналіз проковзування стопи апарата на ОП із використанням даних, що отримані з датчиків інерції. Якщо спостерігати за появою кутових прискорень стоп апарата, які не керуються, то спричинених дією фактору 3 несприятливих наслідків можна буде уникнути. Використовуючи інерційні гіроскопічні датчики можна як раз одержати дані про ці некеровані кутові прискорення. Далі проведено дослідження самовільного складання ланок апарата при використанні розподіленої регулюючої системи керування. Якщо до системи керування апаратом включити мережу регуляторів із диференційною і пропорційною складовими, а також систему сенсорів для відслідковування зміни кутів кінематичних пар, то рівновага АКА не порушиться, і таким чином дія фактору 4 нівелюється. Запрограмована траєкторія руху АКА виконується через вперше встановлену розподілену регулюючу систему розміщення ТЦМ апарата.

Ця задача вирішується за допомогою вперше використаного методу оберненої задачі кінематики та застосуванням *ANFIS*. Далі проведено аналіз передумов дотримання рівноваги АКА за інформацією про значення розміщення апарата у просторі на початку. Коли на початку керування АКА умова стійкості порушується, то він втрачає рівновагу.

Для уникнення несприятливих наслідків, які спричинені фактором 5, у роботі вперше висунуто пропозицію застосовувати наступні умови:

- сила реакції опори однорідно розподіляється на всій площі поверхні стопи апарата, і кутові швидкості кінематичних пар близькі до нуля.
- сила реакції опори однорідно сконцентрована у межах групи екстремумів, і кутові швидкості кінематичних пар близькі до нуля.

- сила реакції опори розподіляється вздовж однієї прямої за контуром стопи або обох стоп, і кутові швидкості кінематичних пар не дорівнюють нулю, і ТЦМ апарата пересувається на протилежну пряму за контуром стопи або обох стоп апарата.

Усталеність руху АКА втрачається за умови, коли розміщення ТЦМ не задовольняє вищевказаних умов.

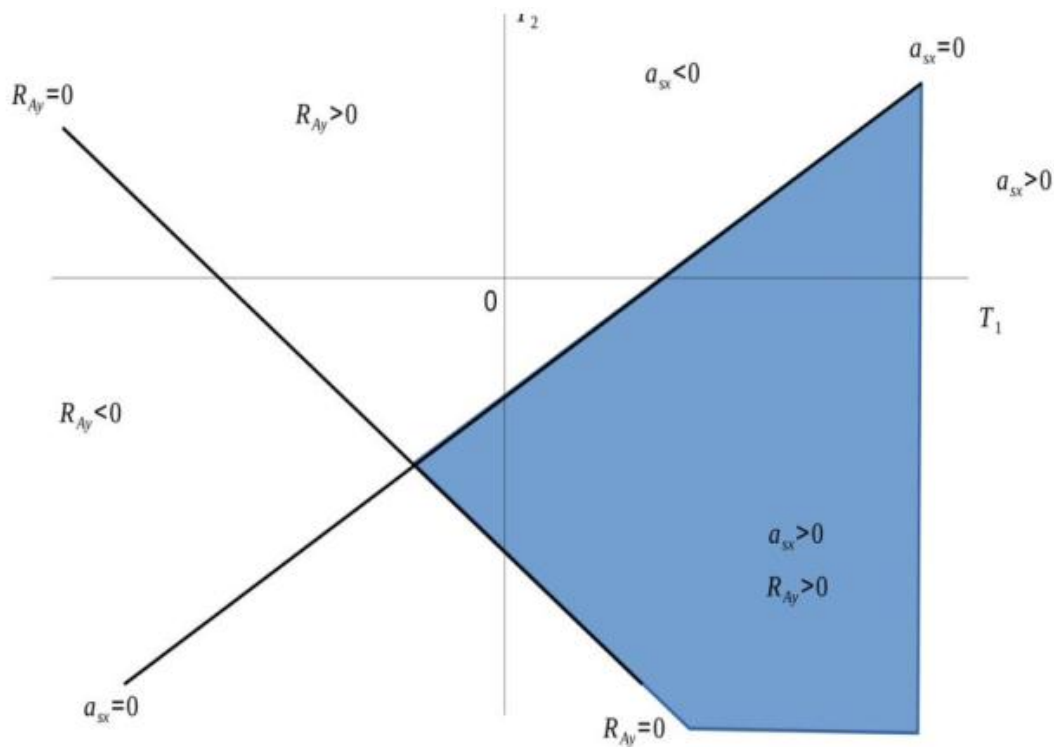


Рисунок 3.1 - Рівномірний розподіл сили реакції ОП на дотичні ланки АКА

Структурна схема СУ дотримання стійкості АКА з застосуванням запропонованих критеріїв стійкості. Дотримання усталеного руху апарата на попередньо невизначеній ОП забезпечується застосуванням системного підходу до спостереження дії факторів «втрати рівноваги» і формуванням керуючого впливу на кінематичні пари АКА. Такий підхід містить ґрунтовну базу у вигляді розподіленої і ієрархічної структури системи керування АКА. Ієрархічність структури системи управління АКА характеризується наступними етапами:

1. Встановлення закономірності появи факторів “втрати рівноваги” АКА один від одного;

2. Виконання умов процесу розміщення ТЦМ апарата з метою уникнення “втрати рівноваги” за рахунок неврахування менш залежних факторів керування усталеним рухом АКА;
3. Забезпечення можливості для порушення факторів при надходженні відповідних команд із системи управління.

Для розподіленості структури системи управління АКА потрібно, щоб обов’язково виконувалися усі наступні етапи:

1. Дотримання самодостатніх факторів “утрати стійкості”;
2. Порушення умов втрати рівноваги апарата у випадку, коли ці умови санкційовані за допомогою системи керування.

У процесі роботи розподілена ієрархічна система управління підтримує стійкість АКА. Рух АКА у статичних і динамічних режимах забезпечується за рахунок і аналізу, і контролю над появою усіх наданих факторів “втрати рівноваги” в той самий час. Багатошарова модель АКА разом із відповідною системою керування підтримки усталеного руху організовує контроль за цими факторами.

Систему можна назвати активною у випадку, коли вона піддається контролю і дозволяє змінювати розміщення апарата за рахунок зміни величин параметрів вектора-стану АКА. І навпаки, систему можна назвати пасивною у випадку, коли її можна формалізувати у складі системи управління АКА, а також коли вона займається дотриманням заданого положення апарата. При цьому враховуються наступне:

1. зовнішні фактори впливу на АКА;
2. дії будь-яких внутрішніх факторів, що не є причиною зміни параметрів у векторі-стану апарата.

На рисунку 3.1 зображено причини впливів і зв’язок блоків систем активного і пасивного характерів разом із каналами взаємодії між підсистемами апарата.

Величини обертових моментів c_{11} для керування “виконавчими органами

апарата” формуються у блоках “Зміна кута кінематичної схеми 1, 2, ...12”. Величина різниці кутів між даним і новим положенням ланок апарата є вхідним параметром блоків $C10$. Блоки “Зміна кута кінематичної пари” отримують величину різниці кутів $C10$ які відправляються з блоку “Пошук відхилення векторів-станів”. Після порівняння пар параметрів у різний час визначається різниця між значеннями кутів. Обидва вектори-стани апарата обраховуються у даний і новий моменти часу і задаються за допомогою блоків “Формування вектора-стану” і “Формування нового вектора-стану”. Дванадцяти кутових параметрів кінематичних пар і три координати ТЦМ апарата є елементами векторів станів. Коли відповідний блок отримує координати нового розміщення ТЦМ $C1$ з блоку “ТЦМ” і значення кутів у кінематичних парах $C9$ з блоку “Перерахунок кінематичних пар АКА”, тоді формується новий вектор-стану. Інформація про кути кінематичних пар $C2$ з блоку “Кінематичні пари” разом з інформацією про розміщення ТЦМ у даний час $C3$ з блоку “Пошук ТЦМ АКА” утворюють поточні параметри стану апарата у блоці “Формування вектора стану”. Інформація про координати положення проекції ТЦМ на поверхню $C7$ відправляється з “Пошук ТПЦМ та екстремумів” і прямує до блоку “Перерахунок кінематичних пар”. Інформація про кутове положення ланок апарата $C2$ виходить з блоку “Кінематичні пари” і прямує до блоку “Пошук ТЦМ АКА”. Блок “Читання розподілу сили реакції ОП”, що включає в себе підсистеми взаємодії з сенсориною стопи апарата, формує параметри для блоку “Пошук ТПЦМ та екстремумів”. У блоці “Константи АКА” зберігаються значення довжин ланок АКА, які потрібні усім блокам системи керування апаратом. Вхідна інформація до блоків “Зміна кута кінематичної пари”, “Формування відхилення векторів-стану”, “Формування нового вектору-стану” і “Формування “вектору-стану” прогресивно накопичується під час роботи АКА, особливо при контакті з ОП. Ця накопичена інформація пересувається каналами $C1-C11$. Оскільки під час роботи АКА його усталений рух може перериватися різними факторами, то для процес

дотримання стійкості апарата необхідна одночасна синхронна скоординована робота усіх блоків системи керування. У процесі роботи АКА певні блоки з його системи управління опрацьовують параметри, що визначені у різний час. Для вирішення проблеми синхронізації структура системи повинна бути ієрархічною і розподіленою, а сама система має включати в себе математичне запізнювання керування.

3.2 Формалізація процесу управління антропоморфним крокуючим апаратом за критеріями розподілу сили реакції опорної поверхні

Згідно зі структурою системи керування функціонал дотримання усталеного руху апарата на ОП разом із впровадженням наведених критеріїв дозволяє сформуванню і вирішити такі додаткові задачі:

- формалізація пошуку розміщення ТЦМ апарата залежно від стану кінематичних пар АКА;
- формалізація визначення розміщення проекції ТЦМ апарата залежно від позиції ТЦМ;
- формалізація визначення розміщення проекції ТЦМ АКА залежно від розподілу сили реакції опори (реалізація у блоках ;
- формалізація визначення граничного розміщення проекції ТЦМ АКА, коли збігається рівновага апарата;
- формалізація пошуку величин параметрів апарата, коли стійкість буде найбільшою з можливих значень і володітиме максимальним запасом;
- формалізація умов, коли апарат зможе відновити стан рівноваги (реалізація у блоках “Формування нового вектору-стану” та “Перерахунок кінематичних пар АКА”). Після вирішення вищенаведених задач існуватиме можливість провести синтез відповідної системи управління, що заснована на вказаних критеріях і яка здійснюватиме дотримання усталеного руху АКА.

3.3 Застосування трьохосьового приводу

Для ефективного управління ходьбою двоногого робота доцільно використати трьохосьовий привід на місці тазо-стегнового та гомілково-стопного суглобу. На основі аналізу проблеми створення три-осевого приводу з широкими операційними кутами, у роботі запропоновано новий підхід до концепції роботи приводу, а саме позиціонування важеля для прикладання сили до об'єкта управління. Це, у перспективі, дозволить підвищити ефективність приводу, шляхом зменшення його енерговитратності та зменшення власної маси за рахунок принципово нового розміщення електричних котушок і системи управління ними. Запропонований у роботі три-осевий привід являє собою електричну машину, яка має можливість нахилу важеля корисного навантаження на кути у діапазоні $\pm 40^\circ / \pm 40^\circ / 360^\circ$. Привід складається з чотирьох частин. Першою частиною є металева основа, яку показано на рисунку 3.2 (1). Основа має посадкове місце для сфери та місця електромагнітних котушок, що позначені на (2). Ці місця разом з котушками заповнені твердим діелектриком. До сфери (4) прикріплений важіль (5) для корисного навантаження. У сфері виконані наскрізні отвори в які імплантовані постійні магніти у кількості, що дорівнює числу пар магнітних котушок (6). Верхня частина корпусу фіксується шайбою (8), що дозволяє сфері вільно обертатись. Основа і шайба накриті гнучкою муфтою (7). Муфта позиціонує котушки у області збереження полярності.

Запропонована концепція може застосуватися для вирішення задачі конструювання сферичних шарнірів для побудови антропоморфних апаратів і складних механізмів.

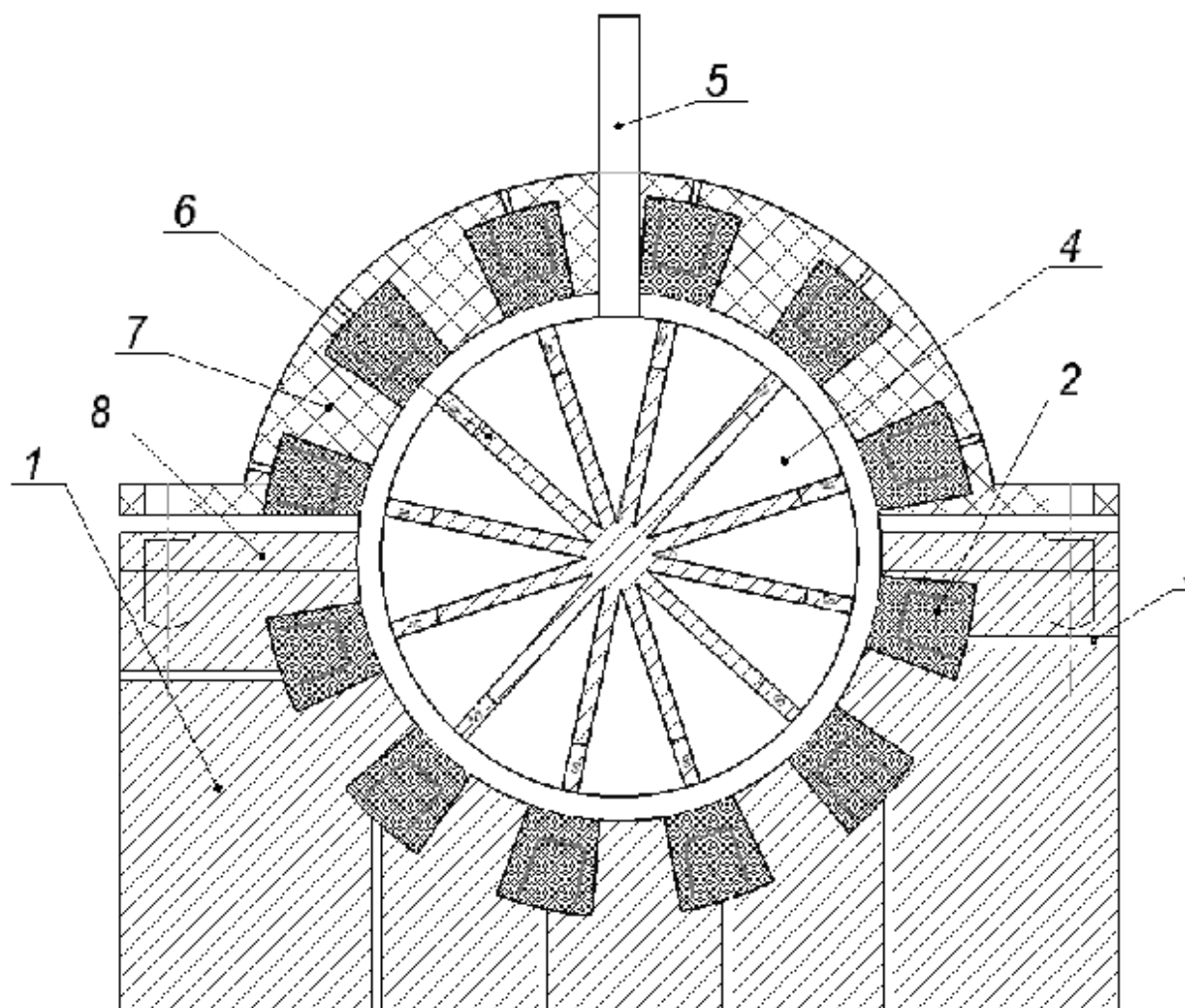


Рисунок 3.2 - Концептуальна схема трьохосьового приводу:
 1 - Металева основа; 2 - Електромагнітна котушка; 3 - Отвір для проводів живлення; 4 - Сфера, що обертається; 5 - Важіль для корисного навантаження; 6 - Постійний магнітних; 7 - Гнучка конструкція; 8 – Шайба

Опис конструкції

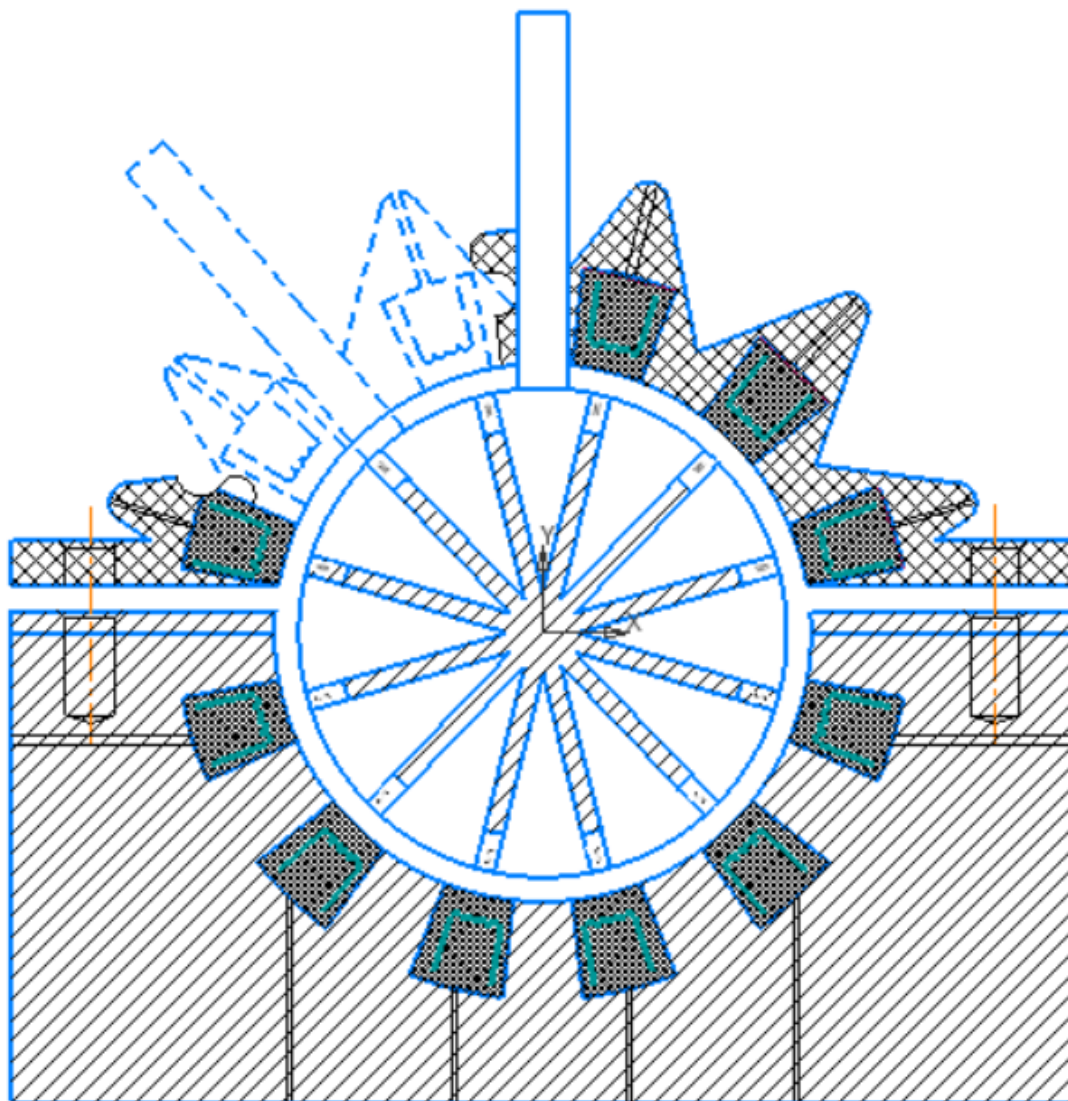


Рисунок 3.3 – Принципова схема трьохосьового приводу

Принцип роботи запропонованого приводу аналогічний кроковому двигуну. Струм що подається на котушки індуктивності створює магнітне поле, яке в свою чергу діє на стрижні з феромагнетику тим самим змушуючи сферу обертатись. Резинова муфта зберігає відповідну полярність котушок відносно одна одної. За рахунок інноваційної конструкції досягається висока швидкодія та крутний момент.

3.4 Структурна формалізація системи управління стійкістю АКА на ОП

На основі розробленої системи критеріїв і методів забезпечення стійкості АКА можна впровадити управління розміщенням апарата. Так, якщо за цими критеріями розмістити проекцію ТЦМ в межах району контакту стоп АКА з ОП, то усталений рух апарата буде забезпечений. Інформація, що отримана з розподілу сили реакції опори, використовується для визначення положення проекції ТЦМ апарата. Такі параметри, як атрибути ланок, проекція ТЦМ та кінематичне розміщення АКА застосовуються для опису місцезнаходження його ТЦМ.

Якщо проекція ТЦМ опиниться поза рамками області контакту стоп з ОП, то рівновага АКА буде порушена. Існує відокремлена ситуація із несприятливими початковими умовами, коли проекція ТЦМ апарата розташовується поза рамками області контакту стоп з ОП. Такий стан глибокого завалу АКА також потребує управління його стійкістю. За допомогою пересування ТЦМ АКА із використанням його ланок можна завжди управляти місцезнаходженням проекції його ТЦМ. Внаслідок руху ланок апарата його ТЦМ також здійснює рух згідно з наступними факторами:

1. Пересування маси ланки. Виконання даного фактору забезпечується за рахунок приводів АКА, регуляторів низького рівня і зворотнього зв'язку.
2. Перерозподіл сили реакції опори. Коли пересувається проекція ТЦМ, то система спостереження в якості зворотнього зв'язку використовує цей фактор.
3. Динамічність усієї системи. Однак цим фактором можна знехтувати, так як він є незначним і його дія згладжується через мінімізацію швидкості пересування ланок АКА.

Для моніторингу розміщення проекції ТЦМ апарата використовується безліч методів, основним з яких полягає в дослідженні розподілу сили реакції

опори на стопу апарата. На стопах апарата встановлено спеціальні датчики тиску, які циклічно зчитують інформацію про вищезазначений розподіл. Ці тактильні датчики відокремлені один від одного і утворюють групи, а також розміщені уздовж траєкторії пересування проекції ТЦМ АКА у процесі його прямолінійного руху. Далі проводиться аналогово-цифрове перетворення і ця інформація у вигляді матриць відправляється до системи управління. Комірки матриці несуть інформацію про силу тиску у точні, а індекси комірок вказують відносно розміщення тактильного датчика на стопі АКА. Після цього блок 4 отримує інформацію про розподіл сили реакції опори, інформацію про розміщення кінематичних ланок апарата, і параметри маси і довжини ланок [15].

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

4.1 Опис ідеї проекту

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Апаратно-програмний комплекс технічних засобів управління рухом двоногого робота	1. АКА, що спроектовані для реального фізичного середовища (наприклад, сфера соціального господарювання)	1. Стабільність ходи АКА
	2. Комп'ютерні моделі, що відтворюють антропоморфний рух людини	2. Можливість застосування на довільній поверхні

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Аналоги			
1.	Гнучкість застосування	Можливість налаштовувати параметри для конкретного АКА	Деяке програмне забезпечення проектується для конкретних моделей АКА			+
2.	Собівартість	Низька	Висока		+	

3.	Складність у налаштуванні	Висока	Середня		+	
4.	Зручність використання	Висока	Середня		+	

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 4.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Математичне забезпечення	SimMechanics I-generation	Є у наявності	Безкоштовна, доступна
2.	Математичне забезпечення	Webots Simulation	Є у наявності	Платна, доступна
<i>Обрана технологія реалізації ідеї проекту: SimMechanics I-generation</i>				

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

Таблиця 4.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартаппроекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	4 670 000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі, %	R = 20%

Таблиця 4.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Потреба у використанні в господарстві надійних АКА	Власники компаній зі сфери соціальної галузі господарства, які мають наміри застосовувати АКА	Різні умови експлуатації АКА	Рішення має бути гнучким у застосуванні та дозволяти АКА пересуватись на довільній поверхні

Таблиця 4.6. Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Поява більш ефективнішого програмно-апаратного комплексу технічних засобів	1. Передбачити можливість модернізації власного продукту 2. Передбачити гнучку систему взаємодії з клієнтами, що дозволить інформувати про наявність актуальних версій продукту
2	Зміна потреб користувачів	Користувачам необхідний вузькоспеціалізований програмно-апаратний комплекс технічних засобів	1. Передбачити можливість налаштування власного продукту

Таблиця 4.7. Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Зростання можливостей потенційних покупців	Зростання фінансування у галузях соціального господарювання і робототехніки	Запропонувати свої послуги підприємствам
2.	Зниження довіри до конкурентів	У конкурентів нещодавно виявлено помилку, внаслідок чого виникла проблема у роботі апаратів	При виході на ринок звертати увагу покупців на надійність власного продукту

Таблиця 4.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції: монополістична	Існує декілька фірм конкурентів.	Підтримка якості і постійна оптимізація
2. За рівнем конкурентної боротьби: міжнародна	Фірми-конкуренти знаходяться в інших країнах.	Адаптація як для вітчизняних так і для зарубіжних клієнтів.
3. За галузевою ознакою: внутрішньогалузева	Алгоритм використовується лише всередині даної галузі.	Постійне вдосконалення

Закінчення таблиці 4.8

4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Види алгоритмів схожі	Створити рішення із урахуванням сильних і слабких сторін конкурентів
5. За характером конкурентних переваг: нецінова	Вдосконалення запчастин у роботів	Зниження ціни і підтримка якості
6. За інтенсивністю: марочна	Бренди існують і конкурують	PR, реклама, просування бренду

Таблиця 4.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Softbank Robotics, Boston Dynamics, Honda	Наявність вже існуючих рішень	-	Контроль якості рішення	Поява ефективнішого рішення
Висновки	Доволі інтенсивна конкурентна боротьба з вже закріпившимися на ринку гравцями.	Є можливості виходу на ринок, але є і конкуренти. Строки – 8 місяців.	-	Клієнти диктують усі умови роботи на ринку.	Моніторинг сучасного стану галузі і постійне вдосконалення власного рішення

За результатами аналізу таблиці 4.9 було зроблено висновок про можливість роботи на ринку з огляду на конкурентну ситуацію. Також було

зроблено висновок щодо характеристик, які повинен мати проект, щоб бути конкурентоспроможним на ринку. Цей висновок був врахований при формулюванні переліку факторів конкурентоспроможності у наступному пункті.

Таблиця 4.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Гнучкість застосування	Можливість налаштовувати параметри для конкретного АКА
2.	Ціна	Дане рішення не потребує використання додаткового обладнання та матеріалів

Таблиця 4.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1.	Гнучкість застосування	15			+				
2.	Ціна	20	+						

Таблиця 4.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: гнучкість застосування, ціна	Слабкі сторони: складність у налаштуванні
Можливості: зростання можливостей потенційних покупців, зниження довіри до конкурентів	Загрози: видавлення з ринку конкурентами, зміна потреб користувачів

Було розроблено альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Таблиця 4.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Розробка програмного продукту, PR, просування бренду	80%	10 місяців
2.	Розробка програмного продукту, безкоштовне розповсюдження	30%	8 місяців

Після аналізу було обрано альтернативу №1.

4.4 Розроблення ринкової стратегії стартап проекту

Таблиця 4.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Дослідницькі центри	Висока	Середній	Невисока	Середня
2.	Підприємства	Висока	Високий	Висока	Середня
Які цільові групи обрано: 2					

Таблиця 4.15. Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Розробка програмного продукту, PR, просування бренду	Ринкове позиціонування	Гнучкість у налаштуванні, висока прохідність	Диференціації

Наступним кроком обрано стратегію конкурентної поведінки (таблиця 4.16).

Таблиця 4.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Ні	Забирати існуючих	Ні	Зайняття конкурентної ніші

4.17. Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформулювати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Рішення має бути гнучким у застосуванні та дозволяти АКА пересуватись на довільній поверхні	Диференціації	Гнучкість у налаштуванні, зручність у використанні	Економічність, гнучкість у налаштуванні, легкість користування

Результатом виконання підрозділу стала узгоджена система рішень щодо ринкової поведінки стартап-компанії, яка визначає напрями роботи стартап-компанії на ринку.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 4.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Гнучкість застосування	Можливість налаштовувати параметри для конкретного завдання	Переваги у гнучкості застосуванні
2.	Ціна	Невисока ціна	Користувачу не потрібно витратити велику суму грошей

Таблиця 4.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I.Товар за задумом	Високопрохідний антропоморфний робот		
II.Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Якість	-	-
	2. Стабільність ходи		
II.Товар у реальному виконанні	Якість: згідно до стандарту ISO 4444 буде проведено тестування		
	Пакування відсутнє		
	Марка (власна): UArobotics		
III.Товар із підкріпленням	До продажу: 1-місячне пробне безкоштовне використання		
	Після продажу: постійна підтримка користувачів		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: ноу-хау			

Таблиця 4.20. Визначення меж встановлення ціни

№	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	3000	5000	500000	1500-2000

Таблиця 4.21. визначення оптимальної системи збуту

№	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
---	---	---	----------------------	--------------------------

1.	Один комплекс	Продаж	Однорівнева	Власні сили та через посередників
----	---------------	--------	-------------	-----------------------------------

Таблиця 4.22. Концепція маркетингових комунікацій

№	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Клієнти обиратимуть надійніший товар	Соціальні мережі, електронна пошта, форуми і виставки.	Ціна, гнучкість застосування, зручність використання	Показати переваги продукту, у тому числі і перед конкурентами	Демо ролик із використанням, реклама.

4.6 Елементи фінансової підтримки стартапу та аналіз ризиків

Таблиця 5.23. Сукупні інвестиційні витрати на реалізацію стартап-проекту

№	Стаття витрат	Сукупні витрати, тис. грн.
1.	Загальні початкові витрати	320
1.1	Проведення пошукових і прикладних досліджень	5
1.2	Розробка проектних матеріалів і ТЕО	5
1.3	Робоче проектування і прив'язка проекту	10
1.4	Витрати на придбання обладнання та устаткування та пристроїв	80
1.5	Витрати на придбання нематеріальних активів	40
1.6	Витрати на утримання обладнання та приміщень	40
1.7	Витрати на передвиробничі маркетингові дослідження	50
1.8	Витрати на створення збутової мережі	30
1.9	Витрати на просування та рекламу	30

1.10	Оплата юридичних послуг	30
2.	Витрати на матеріальні ресурси	0
2.1	матеріали	0
2.2	комплектуючі	0
2.3	сировина	0
3.	Витрати на оплату праці команди стартапу	180
Разом:		500

Таблиця 4.24. Визначення основних фінансово-економічних показників проекту

№	Стаття витрат	Сукупні витрати, тис. грн.
1.	Обсяг виробництва продукції в натуральних показниках	1
2.	Собівартість одиниці продукції, тис. грн.	500
3.	Собівартість виробництва продукції, тис. грн. (3. = 1 · 2)	500
4.	Обсяг реалізації продукції в натуральних показниках	1000
5.	Ціна реалізації продукції без ПДВ, тис. грн.	1,5
6.	Виручка від реалізації продукції без ПДВ, тис. грн. (6 = 4 · 5)	1500
7.	Податок на додану вартість (ПДВ), тис. грн.	150
8.	Валовий прибуток (8. = 6 – 3)	1000
9.	Податок на прибуток	200
10.	Чистий прибуток (10. = 8 – 9)	800

Рентабельність продажів (або маржа прибутку) показує, скільки прибутку приносить кожна гривня з обсягу реалізації:

$$Rs = \frac{\Pi}{B} \cdot 100\%$$

де Π – прибуток;

B – виручка від реалізації продукції.

$$Rs = 53,3\%$$

Період окупності проекту відображає час, який потрібен для того, щоб сума надходжень від реалізації проекту відшкодувала суму витрат на його впровадження:

$$PVP = \frac{II}{ACI}$$

де PVP – період окупності інвестицій, роки;

Π – сума інвестиційних витрат, тис. грн.;

АСІ – щорічні надходження (річний чистий прибуток), тис. грн.

$$PVP = 0.64 \text{ (7.5 місяців)}$$

Рентабельність довгострокових інвестицій – коефіцієнт повернення інвестицій, показник рентабельності вкладень, що у відсотковому співвідношенні демонструє прибутковість (у разі, коли його значення більше 100%) або збитковість (у разі, коли його значення менше 100%) інвестицій в проект. Якщо розрахований показник менший 100%, то інвестиційні вкладення не окупується. Показник може бути розрахований за формулою:

$$ROI = \frac{Д - С}{\Pi} \cdot 100\%$$

де $Д$ – дохід (виручка від реалізації продукції), тис. грн.;

$С$ – повна собівартість, тис. грн.;

Π – сума інвестиційних витрат, тис. грн.

$$ROI = 60\%$$

Таблиця 4.25. Програма запобігання та реагування на ризики проекту

Ризики проекту	Заходи запобігання ризиків	Заходи реагування при виникненні ризиків
Вихід з ладу джерела зберігання даних	Збереження резервних копій файлів проекту, зокрема проектної документації, на різних серверах.	Отримання копії даних з інших серверів
Вихід із ладу інструменту	Своєчасне обслуговування інструменту	Заміна інструменту
Звільнення члена	Детальна декомпозиція	Продовження роботи

команди	завдань, щоб зробити кожне з них максимально простим та незалежним. Використання систем контролю версій	без цієї людини
---------	--	-----------------

Висновки до розділу

Згідно до проведених досліджень існує можливість ринкової комерціалізації проекту. Також, варто відмітити, що існують перспективи впровадження з огляду на потенційні групи клієнтів, бар'єри входження не є високими, а проект має дві значні переваги перед конкурентами.

В рамках даного дослідження були розраховані основні фінансово-економічні показники проекту, а також проведений менеджмент потенційних ризиків. Проаналізувавши отримані результати, можна зробити висновок, що подальша імплементація є доцільною.

ВИСНОВКИ

В даній роботі були розглянуті існуючі методи та підходи до проектування двоногих крокуючих роботів. Проведено дослідження сучасних методів управління рухом ДКР.

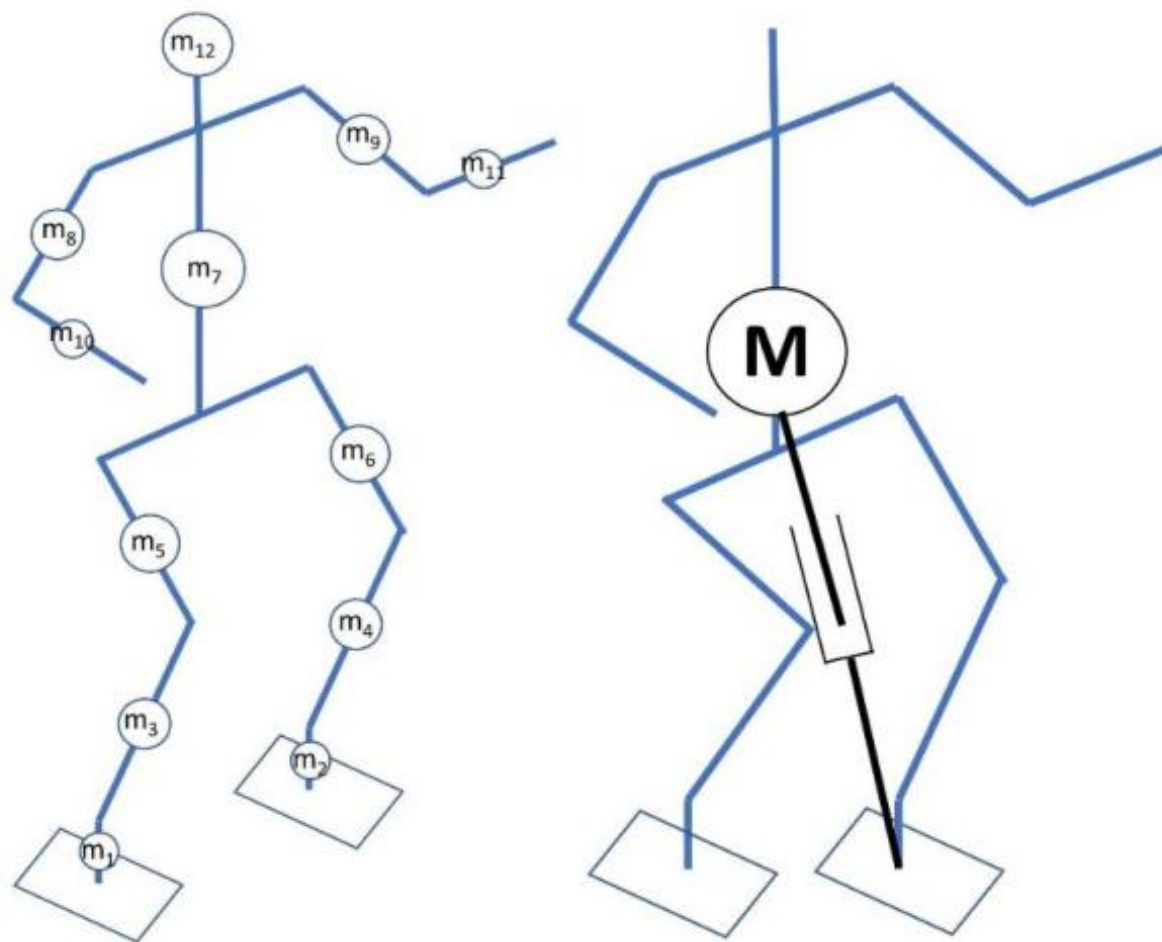
Розроблено математичну модель руху ДКР, що включає в себе формулювання і рішення задач прямої і зворотної кінематики, зворотної динаміки педипуляторів робота, задачу забезпечення руху робота з збереженням рівноваги. У виконанні завдання зворотної кінематики був використаний аналітичний спосіб знаходження кутів. Задача динаміки розглядалася для спрощеної моделі робота в сагітальній та фронтальній площинах з урахуванням фази опори на дві ноги. Як критерій збереження рівноваги руху робота використовувалося поняття точки нульового моменту. Розроблено програмний комплекс системи управління роботом на основі операційної системи ROS. Описано використання трьоххвостового приводу у конструкції робота. Розроблений стартап-проект.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

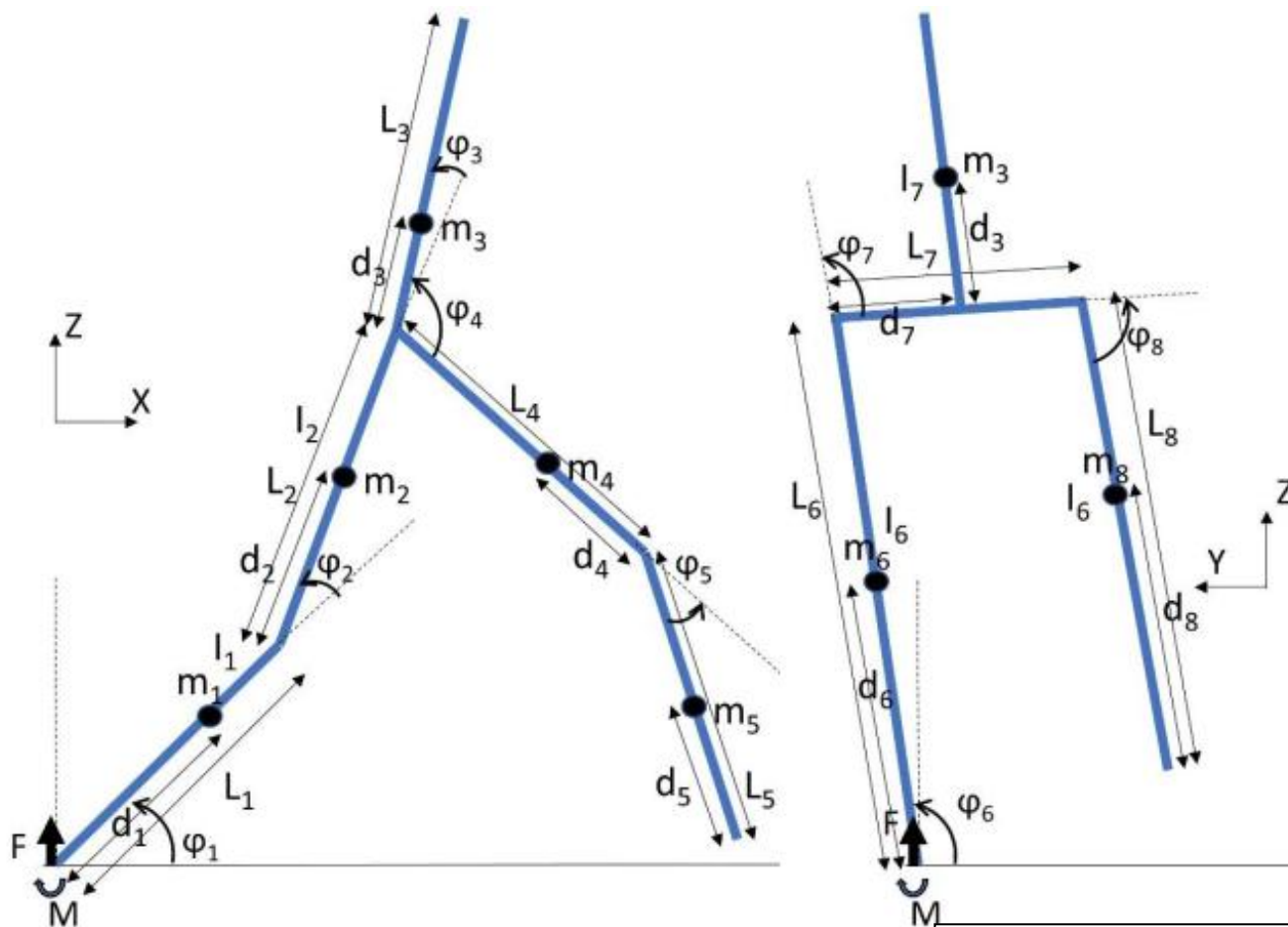
1. Гуменний Д.О. Автоматизація процесу керування усталеним рухом антропоморфного крокуючого апарата – Київ – 2016
2. Ткач М.М., Гуменний Д.О. Математичне моделювання кінематичних зв'язків антропоморфного крокуючого апарата – Київ – 2014
3. Ткач М.М., Гуменний Д.О., Якуніна Н.О. Динамічна модель антропоморфного крокуючого апарата врахуванням моментів та сил взаємодії з опорною поверхнею – Київ – 2015
4. Ткач М.М., Гуменний Д.О. Система управління режимом дотримання рівноваги антропоморфним крокуючим апаратом – Київ – 2014
5. Ткач М.М., Гуменний Д.О., Якуніна Н.О. Моделювання руху антропоморфного крокуючого апарата на довільній твердій поверхні – Київ – 2012
6. ASIMO.Technical Information. – Honda Motor Co., Ltd. Public Relations Division – 2007
7. Кулаков Д.Б. Розробка і дослідження виконавчого механізму з електрогідравлічними приводами для системи управління рухом двоногого крокуючого робота – Москва – 2009
8. Фомічов В.М. Проектування характеристик золотникових розподільвачів в області «нуля» // Гідравлика и Пневматика. М., 2005. №20. С. 49-54
9. Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семьонов С.Е. Управління рухом двоногого крокуючого робота по програмній траєкторії – Москва – 2011
10. Хусаїнов Р.Р. Система управління рухом двоногих кроку робота. – Казань – 2018
11. Хусаїнов Р.Р., Шимчик І.А., Афанасьєв І.М., Магид Е.А. . Модель системи управління біпедального робота в Matlab / Simulink, заснована на методі базових компонент ходьби – Казань - 2016.
12. Dai H., Valenzuela A., Tedrake R. Whole-body motion planning with centroidal dynamics and full kinematics // Humanoid Robots (Humanoids), 2014 14th IEEE-RAS International Conference on IEEE, 2014. – С. 295-302
13. Савеленко І.В. «Синтез системи автоматичного керування електроприводом на базі синхронного двигуна з постійними магнітами» – Кропивницький – 2015
14. Нечаєв В. Геометрія скелета, біомеханіка ходьби, кінематичні ланцюги // Математична морфологія: електронний математичний і медико-біологічний журнал. - 2000. - Т. 3, № 3. - С. 15-24.
15. Горovenko, A. С. Оптимізація процесу дотримання стійкості антропоморфного крокуючого апарата під час руху : магістерська дис. : 126 Інформаційні системи та технології / Горovenko Андрій Сергійович. – Київ, 2018. – 130 с.

16. Vukobratović M., Stepanenko J. On the stability of anthropomorphic systems //Mathematical biosciences. – 1972. – T. 15, № 1-2. – C. 1-37.
17. Kajita S., Matsumoto O., Saigo M. Real-time 3D walking pattern generation for a biped robot with telescopic legs // Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on. – T. 3 IEEE, 2001. – C. 2299-2306
18. Robot modeling and control. / Spong M. W., Hutchinson S., Vidyasagar M.: Wiley New York, 2006
19. Kim, Hyunchang, Myeonghyeon Kim, and Daegab Gweon. "Design of a New Type Multi Degree of Freedom Spherical Actuator."
20. Wang JB, Jewell GW & Howe D (1997) A novel spherical actuator: Design and control. IEEE Transactions on Magnetics, 33(5), 4209-421

ДОДАТКИ



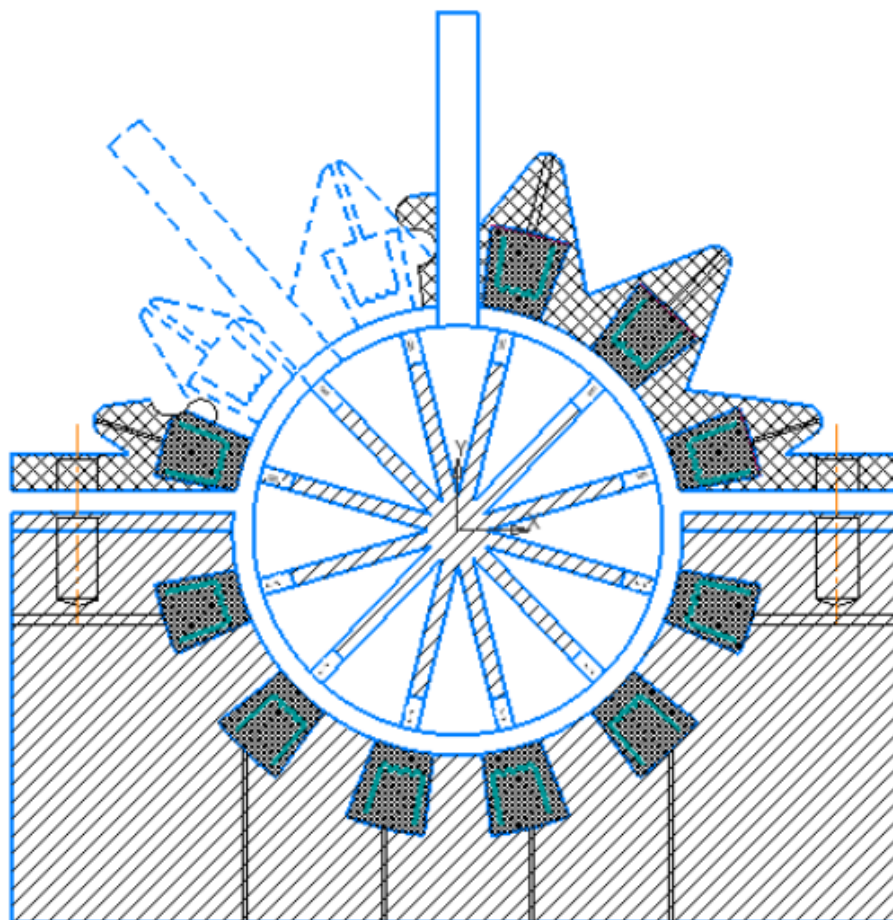
Демонстраційний плакат № 1
До магістерської дисертації на тему:
«Апаратно-програмний комплекс технічних засобів
управління рухом двоногого робота»
Розробив: Ренський О.Л.
Прийняв: Гуменний Д.О.



Демонстраційний плакат № 2
 До магістерської дисертації на тему:
 «Апаратно-програмний комплекс технічних засобів
 управління рухом двоногого робота»

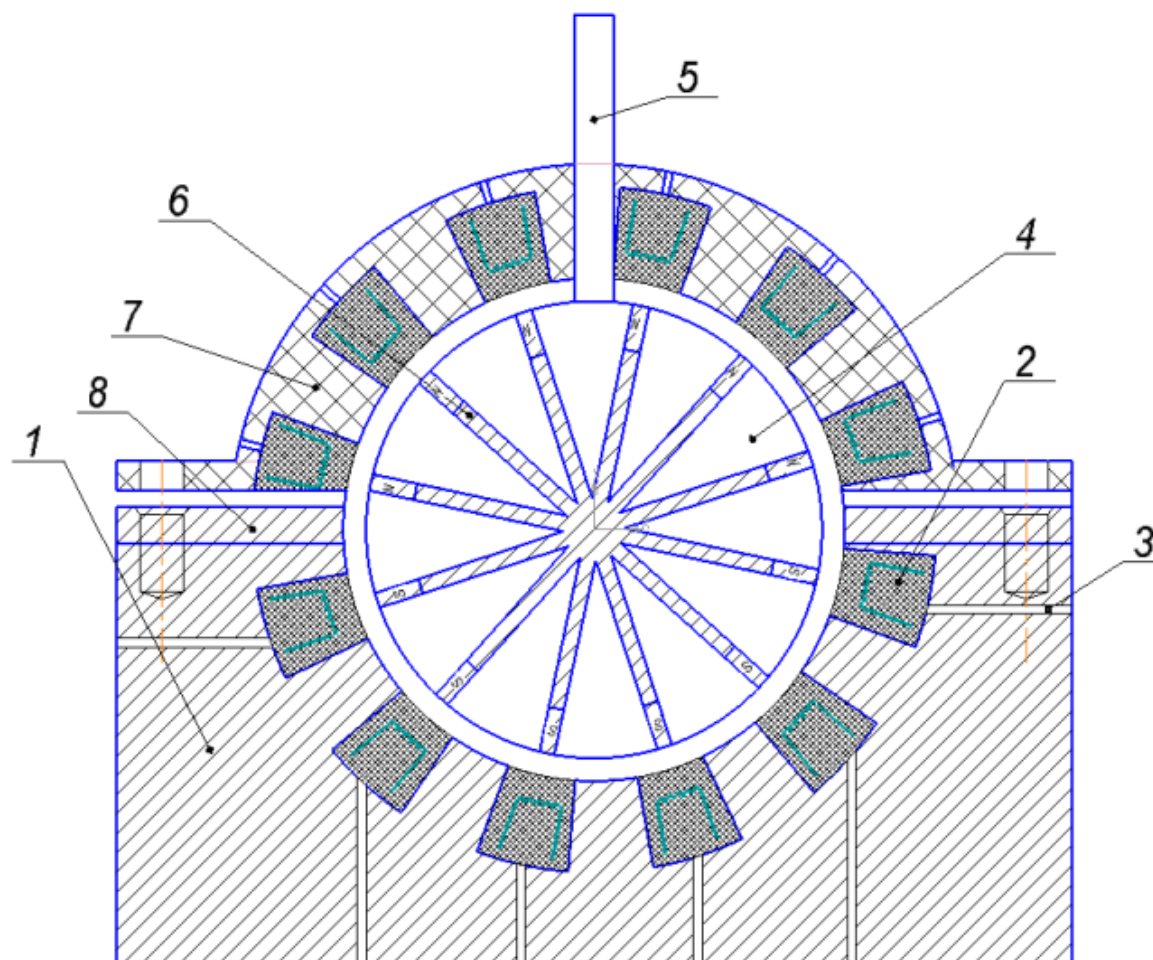
Розробив: Ренський О.Л.

Прийняв: Гуменний Д.О.



Демонстраційний плакат № 3
До магістерської дисертації на тему:
«Апаратно-програмний комплекс технічних засобів
управління рухом двоногого робота»

Розробив: Ренський О.Л.
Прийняв: Гуменний Д.О.



Специфікація	
1	Металева основа
2	Електромагнітна котушка
3	Отвір для проводів живлення
4	Сфера, що обертається
5	Важіль для корисного навантаження
6	Постійний магнітних
7	Гнучка конструкція
8	Шайба

Демонстраційний плакат № 4
 До магістерської дисертації на тему:
 «Апаратно-програмний комплекс технічних засобів
 управління рухом двоногого робота»

Розробив: Ренський О.Л.

Прийняв: Гуменний Д.О.

Doc vs Internet + Library

87.77% Originality	12.23% Similarity	30 Sources
--------------------	-------------------	------------

Web sources: 28 sources found

1. http://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/16302/1/Humennyi_diss.pdf	5.78%
2. https://rada.kpi.ua/files/dissertation/dis_Humennyi_D.O.pdf	5.78%
3. http://asac.kpi.ua/article/download/30689/27351	2.86%
4. http://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/7043/1/16_114.pdf	2.86%
5. http://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/16476/1/21.pdf	2.58%
6. http://asac.kpi.ua/article/download/45527/41728	2.58%
7. https://pt.slideshare.net/DmytroHumennyi/dis-64464039	2.13%
8. https://www.slideshare.net/DmytroHumennyi/dis-64464039	2.13%
9. http://uk.x-pdf.ru/6tehnicheskije/43039-4-ustalenim-ruhom-antropomorfного-krokuyuchogo-aparata...	0.34%
10. https://www.cs.stanford.edu/groups/manips/humanoid2015/contributions/Nikolic-HR2015.pdf	0.26%
11. https://www.slideshare.net/TerryTaewoongUm/about-two-motion-planning-papers	0.26%
12. https://scholar.google.ru/citations?user=s_nrWpsAAAAJ&hl=ru	0.2%
13. https://www.slideshare.net/DmytroHumennyi/humennyi20160629	0.19%
14. http://www.kntu.kr.ua/doc/INTERNATIONAL_SCIENTIFIC_AND_PRACTICAL_CONFERENCE_1...	0.16%
15. http://uk.x-pdf.ru/6tehnicheskije/43039-2-ustalenim-ruhom-antropomorfного-krokuyuchogo-aparata..	0.14%
16. https://www.cmu.edu/me/hdr/Publications/ADHS2015_FootstepCBF.pdf	0.12%
17. https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/101079	0.12%
18. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-94-007-7194-9_51-1.pdf	0.12%
19. https://link.springer.com/10.1007/s10514-015-9479-3	0.12%
20. http://asac.kpi.ua/article/view/39192	0.11%
21. https://oai.org.ua/index.php/record/view/244771	0.11%
22. http://ua.z-pdf.ru/7tehnicheskije/729421-1-ustalenim-ruhom-antropomorfного-krokuyuchogo-apara..	0.09%
23. http://asac.kpi.ua/article/view/92148	0.09%
24. http://home.deib.polimi.it/gini/robot/docs/spong.pdf	0.09%
25. http://sophia.dtp.fmph.uniba.sk/~kovacik/doublePendulum.pdf	0.09%
26. http://asac.kpi.ua/article/download/39192/35398	0.09%
27. http://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/16438/1/15.pdf	0.09%
28. http://uk.x-pdf.ru/6tehnicheskije/43039-1-ustalenim-ruhom-antropomorfного-krokuyuchogo-aparata..	0.09%

Library sources: 2 sources found

IK71mp_Filyayushkin.pdf	2.24%
IK-72mp_HorovenkoAndriiSerhiiovych.pdf	0.59%